The background features a decorative graphic consisting of three concentric blue circles of varying sizes, each with a lighter blue outer ring. These circles are positioned in the upper right and lower right areas of the page. Thin, light blue diagonal lines cross the page, intersecting the circles.

Aplicación gráfica para el cálculo del balance de enlace en redes VSAT

Trabajo Fin de Grado

Alumno: Francisco Bermejo Sánchez

Tutor: Dr. Víctor Pedro Gil Jiménez

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnología
De Telecomunicaciones

Índice

Summary	I
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Objectives	1
1.3 Planning	2
1.4 Memory contents.....	3
1.5 Regulatory framework.....	4
2 Estado del arte.	6
3 Comunicaciones por satélite. “Marco teórico”.	10
3.1 Historia de los satélites	10
3.2 Conceptos básicos.....	11
3.3 ¿Qué es un satélite?	12
3.4 Estructura de los satélites	15
3.5 Bandas de frecuencia utilizadas.....	19
3.6 Órbitas	19
3.6.1 Eclipses.....	22
3.7 Acceso múltiple	24
3.7.1 FDMA. Acceso múltiple por División de Frecuencia.....	24
3.7.2 TDMA. Acceso múltiple por División de Tiempo.....	24
3.7.3 CDMA. Acceso Múltiple por División de Código	25
3.7.4 SDMA. Acceso Múltiple por División del Espacio.....	25
3.8 Multiplexación	26
3.8.1 FDM. Multiplexación por División de Frecuencia	26
3.8.2 TDM. Multiplexación por División de Tiempo	27
3.9 Modulaciones.....	28
3.10 Sistemas VSAT	29
3.10.1 Breve Historia	29
3.10.2 Definición y características	29
3.10.3 Topologías de red VSAT	31

3.11	Formulación para el cálculo de la cobertura y balance de enlace en un sistema VSAT	33
3.11.1	Cobertura geográfica	35
3.11.2	Balance de enlace	37
4	Descripción de la aplicación.....	42
4.1	Funcionalidades	42
4.2	Estructura	44
4.3	Funcionamiento	46
4.4	Dificultades encontradas	51
4.5	Posibles mejoras	52
5	Validación de resultados	53
6	Conclusions	58
6.1	Budget	58

Índice de figuras y tablas

Figure I: VSAT System operation scheme [I].....	II
Figure II: Inbound & Outbound links [II].....	III
Figure III: Example of Linear Path VSAT	VI
Figure IV: Example of Point to Point Path VSAT	VI
Figure V: Blocks Diagram	VII
Table 1: Schedule	2
Figure 1: Gantt chart	3
Tabla 2: Comparación entre herramientas.....	9
Figura 2: Sputnik 1 [11].....	10
Figura 3: Comunicaciones por satélite (esquema básico) [12]	11
Figura 4: International SpaceStation [13].....	14
Figura 5: Segmentos espacial y terreno [14]	15
Figura 6: Transpondedor regenerativo	17
Tabla 3: Bandas de frecuencia	19
Figura 7: Tipos de órbitas [15]	21
Tabla 4: Comparación entre órbitas.....	22
Figura 8: Eclipse de Sol y satelital [16]	23
Figura 9: Generación de señal CDMA [17].....	25
Figura 10: Multiplexación y demultiplexación [18].....	26
Figura 11: Esquema de funcionamiento FDM [19]	27
Figura 12: Esquema de funcionamiento TDM [20]	27
Figura 13: Sistema VSAT [21]	30
Figura 14: Red VSAT en malla [22]	31
Figura 15: Red VSAT en estrella [23]	32
Figura 16 : Enlaces Inbound y Outbound [24]	33
Figura 17: Punto subsatélite	35
Figura 18: Ángulos de elevación y azimut [25]	36
Figura 19: Tabla de valores función Q.....	41
Figura 20 : Ejemplo de VSAT en movimiento lineal	43
Figura 21 : Ejemplo de VSAT en movimiento punto a punto	43
Figura 22 : Diagrama de bloques	45
Figura 23 : Diagrama de flujo	46
Figura 24: Menú principal de la aplicación	47
Figura 25: Introducción de datos del enlace	48
Figura 26: Panel de guardado en fichero	49
Figura 27: Introducción de coordenadas de estación terrena sobre el mapa ...	49
Figura 28: Cálculo de la BER.....	50
Figura 29: Menú "VSAT en movimiento".....	51
Figura 30: Resultados del ejemplo 1	54

Figura 31: Resultados del ejemplo 2	57
Table 5: Detailed budget	59

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

SIGLAS	TÉRMINO EN ESPAÑOL	TÉRMINO EN INGLÉS
AM	Amplitud Modulada	Amplitude Modulation
ASK	Modulación por desplazamiento de Amplitud	Amplitude Shift Keying
BER	Relación de Error de Bit	Bit Error Rate
BPSK	Modulación por desplazamiento de Fase Binaria	Binary Phase Shift Keying
CDM	Multiplexación por División de Código	Code Division Multiplexing
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código	Code Division Multiple Access
FDM	Multiplexación por División de Frecuencia	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias	Frequency Division Multiple Access
FM	Frecuencia Modulada	Frequency Modulation
FSK	Modulación por desplazamiento de Frecuencia	Frequency Shift Keying
GEO	Órbita Geosíncrona en el plano Ecuatorial	Geosynchronous Equatorial Orbit
GPS	Sistema de Posicionamiento Global	Global Positioning System
HEO	Órbita Elíptica Alta	Highly Elliptical Orbit
IBO	Backoff de entrada	Input Back-Off
ISS	Estación Espacial Internacional	International Space Station
LEO	Órbita Terrestre Baja	Low Earth Orbit
LNA	Amplificador de Bajo Ruido	Low Noise Amplifier
MEO	Órbita Terrestre Media	Medium Earth Orbit
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio	National Aeronautics and Space Administration

OBO	Backoff de salida	Output Back-Off
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente	Equivalent Isotropic Radiated Power
PM	Fase Modulada	Phase Modulation
PSK	Modulación por desplazamiento de Fase	Phase Shift Keying
QAM	Modulación de Amplitud en Cuadratura	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Modulación por desplazamiento de Fase Cuadrafásica	Qadriphase Phase Shift Keying
RAE	Real Academia Española	The Spanish Academy
SDMA	Acceso Múltiple por División de Espacio	Space Division Multiple Access
TDM	Multiplexación por División de Tiempo	Time Division Multiplexing
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo	Time Division Multiple Access
TT&C	Seguimiento, Telemetría y Comando	Telemetry, Tracking and Command
TWT	Tubo de Ondas Progresivas	Traveling-Wave Tube
UHF	Frecuencia Ultra Alta	Ultra High Frequency
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas	Union of Soviet Socialist Republics
VSAT	Terminal de Apertura Muy Pequeña	Very Small Aperture Terminal
WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda	Wavelength Division Multiplexing

Summary

This document contains a brief explanation of most important points involved in satellite communications, the particular characteristics for VSAT systems and a deep vision of a graphic application to evaluate them. This application allows to study any VSAT link budget according to the terminals and satellite parameters and characteristics.

The main aim is to develop an useful tool for teaching and research at our University Carlos III. Researchers may find it useful to study VSAT systems deeply. The application is totally free, so they may have it and modify or add some code to make the tool evolve.

Teachers may also use it to complete their explanations in class or to solve exercises. Even students may find it useful to study for the exams.

These are the specifications for the app:

- It must be able to evaluate any VSAT system quality. For that it is necessary to calculate every needed parameter.
- To make easy its use, the intention is that it is as graphic and intuitive as possible.
- Calculate link budget in a simulation of satellite communications with a VSAT terminal in motion around the world.

This document is divided in six chapters. The first of them is an introduction, where it's given a non technical vision of the topic, and the objectives and planning appear.

In the second one, some similar applications are exposed and compared with the developed one.

The third one has two parts. First, satellite communications' clues are explained and then, main characteristics of VSAT systems are mentioned.

After it, in fourth chapter it is explained how the application works. There are mentioned also its structure and some possible improvements. The next chapter is related with this one, so tool's results are compared with manual results. It means that some study cases are solved manually and with the tool and after it they are compared.

The sixth and last chapter contains the conclusions obtained by doing this Final Thesis.

But why satellite communications? And why VSAT systems?

The answer is easy and valid for both questions: because they are useful and profitable. Satellite communications are very popular nowadays because they offer some services impossible to offer otherwise and some that complement other already given services in the Earth. They are profitable despite their high cost. VSAT is a particular satellite communications system based on Very Small Aperture Terminals. The advantages that VSAT systems offer against other kind of systems are::

- Easy adaptation to each user wishes
- Easy reconfiguration and growth
- Great quality (low BER)
- Lower cost. This is probably the most important point.

VSAT systems have some peculiarities that make them so important.

In satellite communications it's important to distinguish between space and ground segment. The first one is composed by stations located in the space, and the ground segment by stations located in the Earth.

In VSAT systems, the satellite is the space segment and the ground segment is composed by the Hub station and one or more VSAT terminals. Hub is the central station which communicates with all the VSAT terminals through the satellite. In the following image there's an operation scheme:

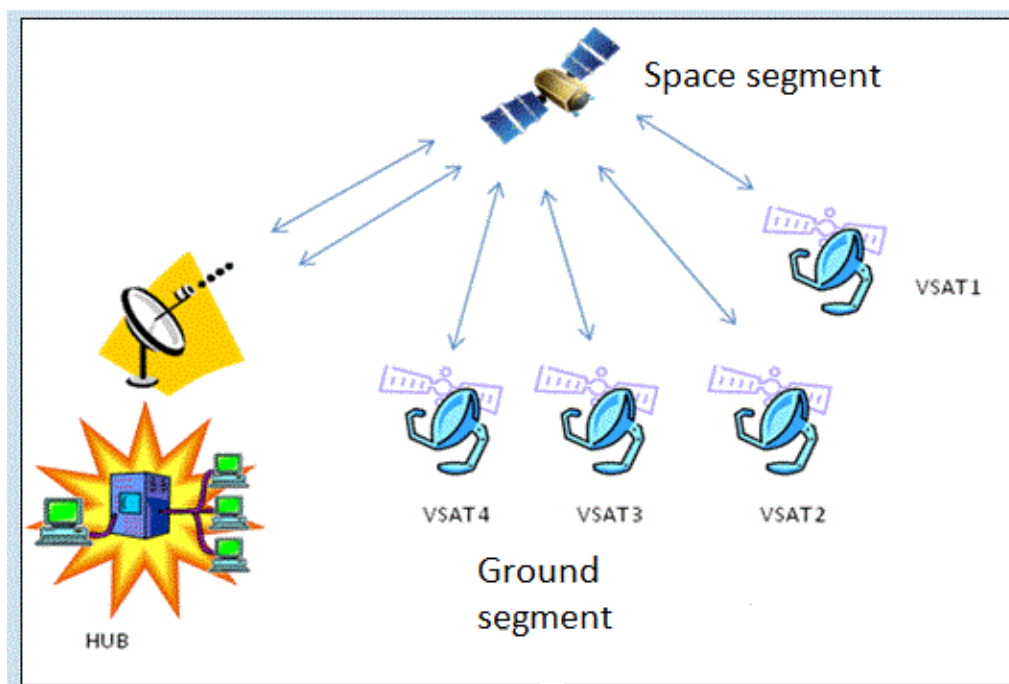


Figure I: VSAT System operation scheme [1]

There are two kind of links in VSAT systems:

- Outbound: Hub - satellite - VSAT
- Inbound: VSAT - satellite - Hub

The most common one is the Outbound, where Hub transmits information to the satellite and it just repeats the transmission for all VSAT terminals. However, both of them are important. In the following figure both links are perfectly differentiated:

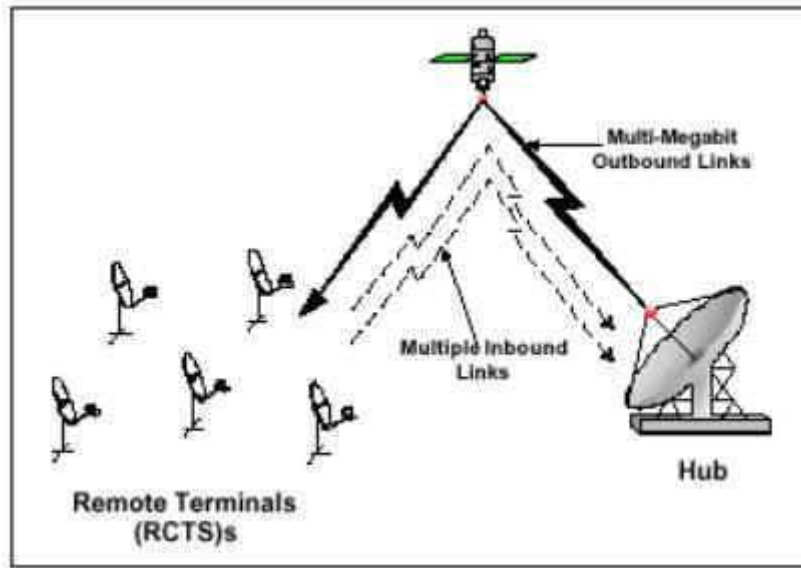


Figure II: Inbound & Outbound links [II]

The frequency bands used are the C, Ka and Ku bands.

One of the most important points in VSAT systems is that the satellite is in the Geosynchronous Equatorial Orbit (GEO), which most important characteristic is that it's approximately 36000 Km far from terrestrial surface and its **orbital period** is the Earth's **rotation period**, which means that the satellite is always in the same relative point in the Earth. It has an immediate impact: full coverage (except for eclipses).

Both the Hub and VSAT terminals need to point their antennas to the satellite, which is possible using the **azimut** and **elevation angles**. They are very important in satellite communications, but the elevation angle is also important to evaluate a satellite coverage. It must be greater than 5° - 10° for the earth station to make possible the communication. This angle may be calculated as follows:

$$\hat{El} = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta \cos \Delta\varphi - \frac{R_e}{R_e+h}}{\sin[\cos^{-1}(\cos \theta \cos \Delta\varphi)]} \right) \quad (I)$$

Where R_e is the equivalent radius of the Earth, h is the height of the satellite and $\Delta\varphi = \varphi_T - \varphi_S$ is the relative longitude, which means the difference between the

earth station longitude and the satellite longitude. θ is the earth station latitude. Satellite latitude is 0 because of its orbit.

To evaluate the link budget, first it's important to differentiate some links:

- Uplink Inbound
- Downlink Inbound
- Uplink Outbound
- Downlink Outbound

The first thing it's needed to calculate is the Carrier-Noise ratio, and it is calculated for each one of the mentioned links. It is calculated as follows:

$$\frac{C}{N_0} = EIRP_{Tx} + \frac{G}{T_{Rx}} - IBO/OBO - L_{prop} - 10 \log K \quad (II)$$

or

$$\frac{C}{N} = EIRP_{Tx} + \frac{G}{T_{Rx}} - IBO/OBO - L_{prop} - 10 \log KBW_{Link} \quad (III)$$

The units of $\frac{C}{N_0}$ and $10 \log K$ are dBHz and the units of $\frac{C}{N}$ and $10 \log KBW_{Link}$ are dB. EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) is a transmission factor expressed in dBW. $\frac{G}{T_{Rx}}$ is a quality factor in reception expressed in dB/K, the propagations losses (L_{prop}) are expressed in dB and the Back-Off is a particular characteristic of the satellite and it may be either in reception (IBO) or in transmission (OBO). It is expressed in dB.

There must only be a term for each link, Inbound and Outbound. It is calculated as follows:

$$\left(\frac{C}{n_0}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{n_0}\right)_\uparrow^{-1} + \left(\frac{C}{n_0}\right)_\downarrow^{-1} \quad (IV)$$

$\frac{C}{n_0}$ is expressed in natural units, and once this term is calculated, the next step is to get the bit Energy-Noise ratio, $\frac{e_b}{n_0}$.

$$\frac{e_b}{n_0} = \frac{C}{n_0} \cdot \frac{1}{R_b} = \frac{C}{n} \cdot \frac{BW}{R_b} \quad (V)$$

Here $\frac{e_b}{n_0}$ is expressed in natural units, BW is the link bandwidth expressed in Hz and R_b is the bit rate, expressed in bit per second (bps).

After it, the Bit Error Rate (BER) is calculated depending on the modulation used:

- BPSK:
- QPSK:

$$BER = Q\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (VI)$$

- N-QAM

$$BER = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{N}}\right) Q\left(\frac{E_b \log_2 N}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{3}{N-1}}\right) \quad (VII)$$

With this parameter it is possible to study the quality of each link (either Ib or Ob), so if there's geographic coverage (elevation angle > 5°-10°) and the BER is low enough, depending on desired performance, it will be considered a good link. It will be a bad link otherwise.

This is the formulation used in the application to calculate the link budget. There are three different cases where this is necessary, the three situations implemented in the tool.

The first of them is a normal VSAT system, with a hub, a satellite and a VSAT terminal. Each one has its own characteristics and location. These characteristics are previously introduced by the user and may be saved in file to load them in future uses.

The other two situations are a simulation of a VSAT terminal in motion and communicating with the satellite and Hub station meanwhile. Two different scenarios are contemplated:

- **Linear Path:** the VSAT moves in a straight line. Link budget is analyzed in a number of points previously entered by the user.
- **Point to Point Path:** the VSAT terminal moves from a point to another one and the link quality is studied in each of these points.

The points where there is coverage appear in color blue, but as soon as it doesn't happen, the points turn into red.

In the following figures there is an example of each one of these situations:

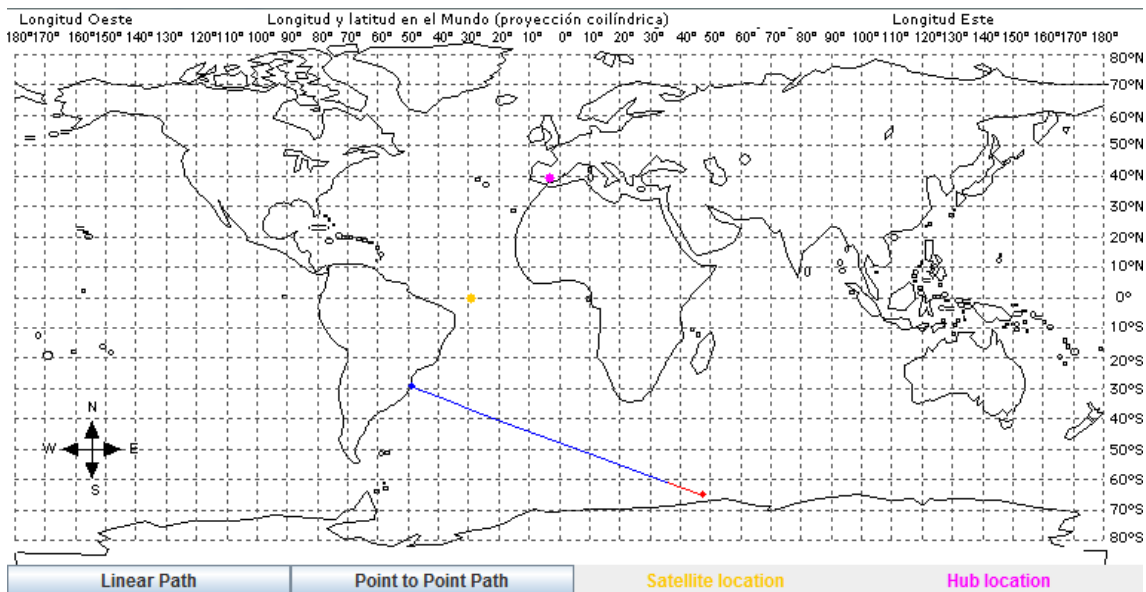


Figure III: Example of Linear Path VSAT

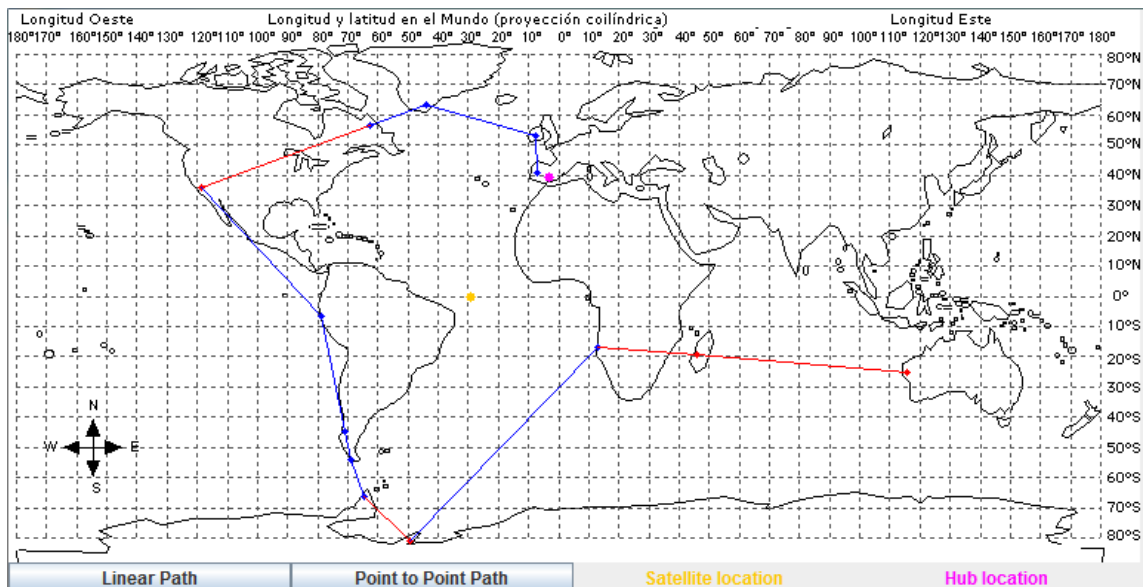


Figure IV: Example of Point to Point Path VSAT

The application has been developed divided in blocks or modules to make it easier to understand and to change the code. These are the blocks:

- **Data entities.** There are four entities involved: satellite, VSAT terminal, hub and link characteristics.
- **Saving and loading files.**
- **Graphics:.** This one is divided in three. One of them is the general interface one and the others are: data input and results show and extra utilities (VSAT in motion).
- **Calculations block.**

In the following figure there is the interaction between these blocks

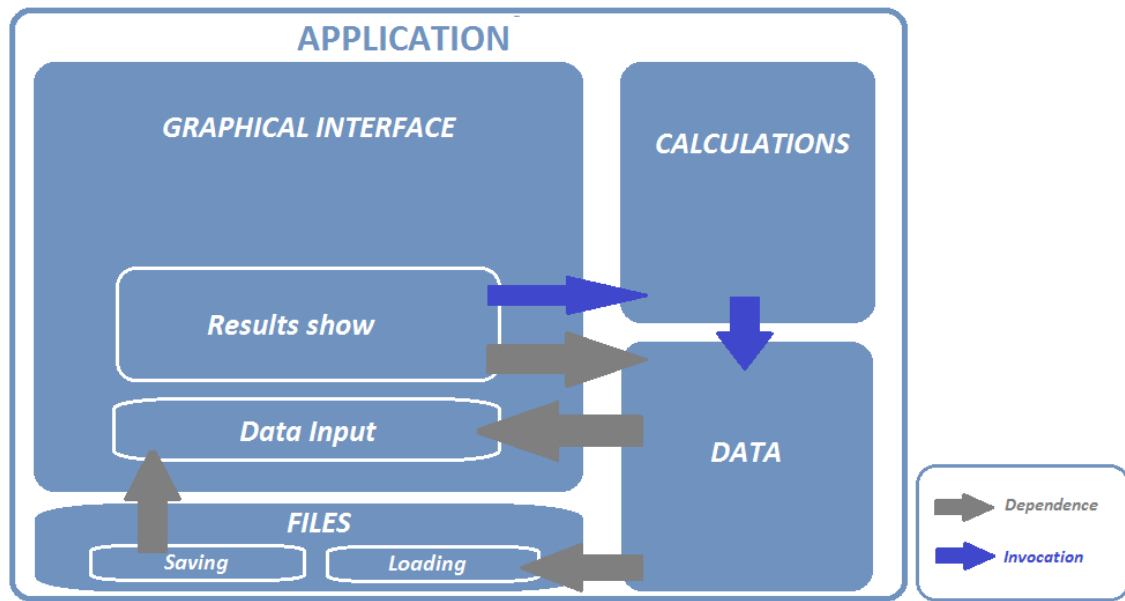


Figure V: Blocks Diagram

The application is easy to use, intuitive, divided in modules and graphic. All the predefined goals have been met.

1 Introduction

1.1 Motivation

The motivation for this Degree Thesis is to implement a tool that may have an impact on the market for satellite communications based on VSAT systems.

Some companies engaged in satellite communications could find useful an effective graphical tool able to evaluate the links quality. The first version may be not powerful enough to compete in this market but improvements may be implemented for future releases.

The tool can also be used for teaching and even research. In fact, this is the main motivation to develop the tool.

Staff of the University may use it completely free to make researches or studies because, of course, the application may be modified or complemented with any other app.

Teachers may also use it, for example, to speed up the correction of tests, to complement explanations for the students and even to propose practical exercises based on its usage

1.2 Objectives

From the beginning, the aim was to implement an interactive graphical user application capable of performing the necessary calculations to assess any VSAT link quality. It was also intended to ensure that the tool was easy to use, which means to do it as intuitive as possible.

To do such a thing, it was necessary to offer the user the possibility to enter the parameters of the different mechanisms or technologies involved in satellite communications.

A very specific objective was to evaluate the quality of a communication satellite with a VSAT station in motion.

As it is mentioned in the section above, another objective was teaching. The application was thought that it would be used by students, so this was one more point to make it intuitive and easy to use.

1.3 Planning

The plan to be followed during the development of the tool is shown in the following table:

TASK	TERM (days)
Final Project assignment	1
Reception and reading of documentation	3
Information research	10
Application development	50
Memory writting	30
Application revision	12
Memory revision	10
Presentation preparation	6
Final Project exposure	1
Total	123

Table 1: Schedule

There may probably be some delays in any tasks, especially in the application development due to the difficulties that may appear. As you can see, memory writing and application development compose the bulk of the Degree Thesis, since they are the most important tasks.

To have a graphical view of the duration of tasks there has been realized a Gantt chart:

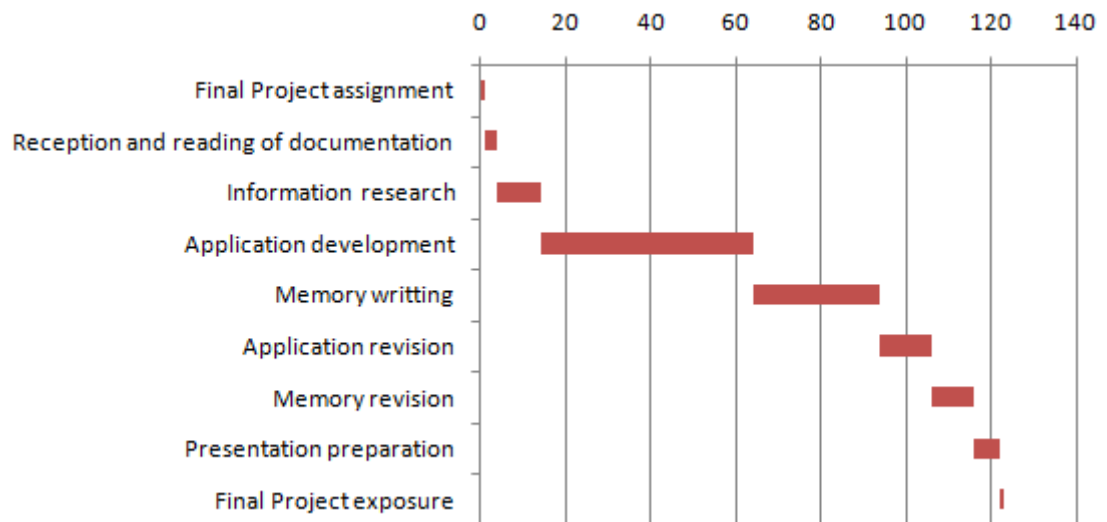


Figure 1: Gantt chart

In spite of the fact that all tasks are perfectly separated and distinct from each others in the chart, it is likely that several of them are carried out in parallel complemented by each other. A clear example is the information research, which will take place at the beginning to start with the application development, but the information will be searched as soon as it's needed.

1.4 Memory contents

The memory is structured with the intention of gradually introduce the reader to the subject that this Degree Thesis approaches, satellite communications based on VSAT systems, in order to make possible to understand the purpose and performance of the implemented tool. With that aim, the memory is organized as follows:

- Introduction: it is intended to present the subject from a non-technical point of view, approaching issues such as the reasons for this project or the steps for its development. Regulatory framework is also included in this chapter.
- State of the art: at this chapter, similar tools to the one about to be developed will be evaluated and compared.
- "Theoretical framework". This one and the next section represent the bulk of the memory. First, a brief introduction to the history of satellite communications and then its theoretical basis will settle. This theory is important to understand how this kind of communications work. At the end of this chapter some specific characteristics of VSAT systems will be mentioned.

- Description of the application. Here it will be explained how the developed tool works and some solved cases will be compared with tool results to validate its proper operation.
- Conclusions. As its name suggests, this section will present the conclusions drawn by the project.

1.5 Regulatory framework

Following the first satellite into orbit, aerospace industry exploded and soon it was necessary to create laws to regulate the use of Earth orbits and radio spectrum, both things important points in satellite communications. Thus it was decreed in Spain Law 31/1987, on the Regulation of Telecommunications, which was the first to approach the regulation of communication satellites. It may be found in [1], although it is repealed nowadays.

The use of the geostationary orbit (which is explained later) encouraged the transmission of images and sounds by satellite. It was developed and soon some TV channels were transmitted by satellite. So it was necessary to create a specific law for satellite television; Law 35/1992, satellite TV, which may be found in [2].

However, soon it was necessary to make significant changes in these laws due to technological advances and changes in this sector market. For this purpose the Law 37/1995, of December 12th, Satellite Telecommunications, which remains in force today and is available in [3], was decreed.

The most important points of this law are:

- Any service that, to be provided, is mainly worth of satellite communication networks will be, for all purposes, a private service. This service will may be offered both having the ownership of the satellites involved as leasing the use of these networks. Rights to own one or more satellites and to assign them to third parties are implicit.
- To get authorization for providing these services it will be a must to submit the relevant application that fulfills the technical and service provision Regulation to the Ministry of Public Works, Transport and Environment. There must be transparency, objectivity and non-discrimination in granting such an authorization.
- If the authorization is granted, the fee for spectrum reservation will have to be paid.

- Satellite networks will may be connected to public telecommunications networks as soon as the equipment complies with the technical specifications.
- Although satellite communication networks are used for it, this law does not apply to the provision of the following services:
 - Basic telephony.
 - Sound broadcasting.
 - Diffusion of public and some private TV channels included in some other laws.

Additionally, the fact that this law was passed in order to promote the national competition in the telecommunications sector is mentioned.

In the end, it includes changes to some articles of several laws and the repeal of the above mentioned law, Satellite TV one.

2 Estado del arte.

La herramienta desarrollada calcula balances de enlace en sistemas VSAT en pos a los datos introducidos por el usuario. Además es gráfica, lo que facilita su uso.

No obstante, no es una herramienta exclusiva en esta área. De hecho existen otras aplicaciones similares, como por ejemplo:

- **Calculador Automático de Balances de Enlace en Comunicaciones por Satélite Geoestacionarias** realizado en la *Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla*. Es una aplicación gráfica con una interfaz sencilla pero vistosa e intuitiva. No obstante, las dos características más destacables son:
 - Permite introducir gran cantidad de datos relativos a los aparatos y/ o agentes implicados en la comunicación.
 - Tiene muy en cuenta el factor de las pérdidas y permite introducirlas de diferentes tipos (propagación, atmosféricas, ruido...).

Se puede encontrar toda la información referente a la aplicación en [4].

Es una aplicación muy completa: y gráfica. Es la más parecida a la herramienta del TFG, aunque esta permite introducir más parámetros. Sin embargo, no es gratuita.

- **Balance de Potencias para GEO y para LEO, ICO y HEO.** Desarrollado en la *Universidad Politécnica de Valencia*. Hay dos documentos Excel, uno para enlaces GEO (*Geosynchronous Equatorial Orbit*) y otro para los otros tres tipos: LEO (*Low Earth Orbit*), MEO (*Medium Earth Orbit*) y HEO (*Highly Elliptical Orbit*). Cada uno consta de varias hojas de cálculo. En algunas de ellas se pueden introducir los distintos parámetros y ver algunos cálculos “intermedios”, tales como la distancia entre estación terrena y satélite o ángulo azimut, y en la última de ellas se muestra el resultado final, la BER (*Bit Error Rate*). Es una herramienta bastante sencilla, intuitiva y de fácil uso. Ambos documentos están disponibles, de manera gratuita, en [5].

La herramienta que se va a desarrollar solo calcula balances de enlace para enlaces GEO, pero ofrece una interfaz gráfica que la hace más intuitiva y le aporta muchas utilidades extra.

- **Software para el análisis y cálculo de enlaces satelitales utilizando Matlab. “SAT UTS”.** Es una aplicación desarrollada en Matlab por las

Unidades Tecnológicas de Santander (UTS). En ella, el usuario puede introducir datos manualmente o cargarlos de una base de datos, así como situarlos sobre un mapa que el programa carga de Google Maps. También tiene en cuenta las pérdidas por propagación en espacio libre y por lluvias (para las cuales sigue la recomendación de la UIT, Unión Internacional de las Telecomunicaciones). Se implementó para la región de Colombia, pero se puede implementar para otras regiones variando la información de las bases de datos. Puede encontrarse toda la información relevante en [6].

Es una herramienta muy potente. Su sistema gráfico es más potente que el que ofrece la herramienta de este Trabajo Fin de Grado, pero no ofrece tanta interactividad con el usuario. Tampoco es una aplicación gratuita.

- **Satcoms UK** es una aplicación online que ofrece dos opciones. La primera permite al usuario introducir algunos de los parámetros involucrados y calcular el balance de enlace. La segunda opción tiene más parámetros de entrada y también de salida, es decir permite introducir más parámetros de los terminales y satélite y da algunos resultados concretos. Para usar esta opción son necesarios conocimientos más profundos del tema. Es posible y totalmente gratuito hacer uso de la aplicación en [7].

A pesar de que es fácil de usar y bastante intuitiva, no ofrece apenas utilidades a diferencia de la aplicación a desarrollar. Tampoco es apenas gráfica. No obstante, es muy útil porque se puede hacer uso de ella desde cualquier explorador de Internet.

- **Satmaster Pro Satellite Link Budget Software**. Esta es una aplicación muy potente que tiene en cuenta las pérdidas por lluvia, la atenuación por nubes y la absorción de las capas de la atmósfera. También predice los momentos de no cobertura por la influencia del sol (eclipses). Pero estas son solo algunas de las peculiaridades más destacables, pues tiene muchas y distintas opciones. Se trata de una herramienta comercializada. Tanto es así que tiene disponible una Demo, que se puede adquirir gratis en [8]. También se puede adquirir la última versión por 169 libras(231.95€).

Esta es con mucha diferencia la herramienta más potente que se ha encontrado, pues ofrece una enorme variedad de opciones. Es tremendamente completa, pero es una aplicación de pago estricto

- ***.Satellite Link Budget Calculator.*** Es una aplicación online que permite al usuario introducir y calcular distintos de los parámetros propios de un enlace vía satélite. Es fácil de usar aunque no es gráfica. Se encuentra disponible en [9], y se puede hacer uso de ella desde cualquier navegador.

La aplicación que se va a desarrollar presenta varias ventajas con respecto a esta. Es gráfica, bastante más intuitiva y fácil de utilizar y tiene más utilidad.

- ***Downlink Budget calculator.*** Recibe muchos parámetros de entrada del usuario para después calcular el balance de un enlace de bajada (del satélite a la estación terrena y no al revés). Es intuitiva y permite introducir muchos parámetros. Además permite seleccionar satélites ya en órbita junto con sus coordenadas, pero algunos de los parámetros son complejos y puede resultar difícil de utilizar. La aplicación es online y se puede hacer uso de ella en [10] desde cualquier navegador de Internet.

Es una aplicación un poco compleja, pues son muchos los parámetros que se pueden introducir y por ende muchos los conocimientos que hay que tener sobre el tema. No es gráfica y tiene poca utilidad, pues tan solo permite calcular balances de enlaces de bajada. La aplicación a desarrollar, en cambio, cumple con todas estas características.

En definitiva, se puede concluir que de las herramientas que son más potentes ninguna es gratuita.

Cabe destacar que la herramienta a desarrollar es la única enfocada a los sistemas VSAT y, además, es la más interactiva para con el usuario.

Se ha realizado una tabla comparativa entre las diferentes herramientas similares a la de este TFG, que también está incluida.

HERRAMIENTAS	Gratuita	Modificable	Intuitiva	Fácil uso	Gráfica	Utilidad
Herramienta TFG	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Enlaces VSAT. Terminal en movimiento
Calculador Automático de Balances de Enlace en Comunicaciones por Satélite GEO	No	N/A	Sí	Sí	Sí	Enlaces GEO. Muy completa
Balance de Potencias para GEO y para LEO, ICO y HEO	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Varias órbitas. Muy sencilla.
SAT UTS	No	Sí	Sí	Sí	Sí. Muy potente	Muy completa
Satcoms UK	Sí	No	Sí	Sí	No	Limitada pero muy práctica (navegador)
<i>Satmaster Pro Satellite Link Budget Software</i>	No (Demo sí)	No	Sí	Sí	N/A	Muy completa y potente
<i>Satellite Link Budget Calculator</i>	Sí	No	Sí	Sí	No	Limitada pero muy práctica (navegador)
<i>Downlink Budget calculator</i>	Sí	No	Sí	No	No	Muy limitada (solo downlink)

Tabla 2: Comparación entre herramientas

3 Comunicaciones por satélite. “Marco teórico”.

3.1 Historia de los satélites

Al igual que la gran mayoría de avances importantes en Telecomunicaciones, el del primer satélite surge en una guerra: la Guerra Fría. La gran ventaja que supondría la posibilidad de comunicarse a grandes distancias por medio de “una red privada” fue lo que impulsó a la URSS (Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas) a desechar la primera idea de los cables submarinos debido a su alto coste y a investigar esta área para, en Octubre de 1957, conseguir poner por primera vez un satélite en órbita: El *Sputnik 1*. Tan solo el envío de un pitido por radio bastó para probar su correcto funcionamiento y desencadenar una carrera por la conquista del espacio.

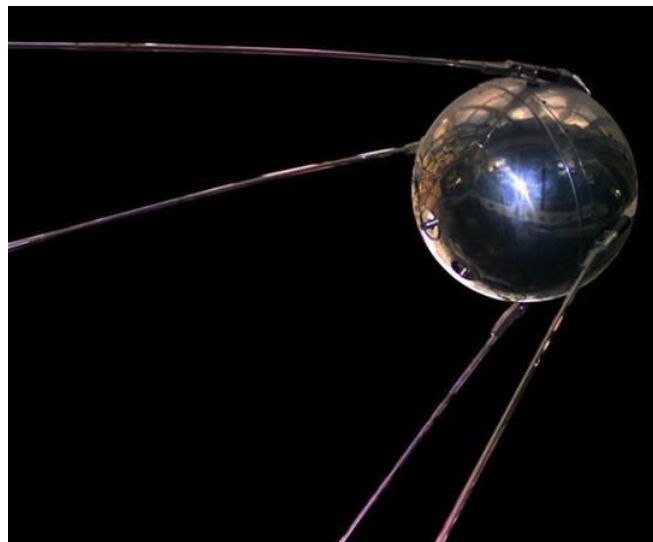


Figura 2: *Sputnik 1* [11]

Tras este gran acontecimiento, se siguieron lanzando satélites y fue en 1962 cuando se lanzó el primer satélite de comunicaciones que logró estar activo. Esto quiere decir que hubo más lanzamientos pero que todos fallaron. Hay que destacar que estos primeros satélites tan solo reflejaban las señales enviadas desde la Tierra. Pero pronto comenzaron a utilizar sistemas activos, recibiendo unas señales y generando otras en respuesta.

Poco a poco se fueron haciendo mejoras en lo relativo a este tipo de comunicaciones, como por ejemplo en las órbitas o en los métodos de acceso múltiple y multiplexación (temas en los que se ahondará más adelante).

Pero no conviene pensar que las comunicaciones eran la única aplicación que se les daba a los satélites. También se usaban con fines militares, meteorológicos o simplemente para explorar el espacio. Y, más adelante, comenzaron a dar un servicio de radiolocalización, que se basa en el sistema GPS (*Global Positioning System* –

Sistema de Posicionamiento Global), que no solo es el nombre del sistema sino que también es el nombre por el que se conoce comúnmente este servicio hoy en día.

Como se puede apreciar, no son pocas las posibilidades que los satélites ofrecen. Y es que es tal la importancia de esta área, que según los datos de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration* – Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio) recabados hasta Julio del 2013, alrededor de 8000 satélites orbitan la Tierra y de ellos, en torno a 3000 están operativos, sin tener en cuenta los satélites de los cuales no se tienen datos por ser de espionaje o uso militar y con ello confidenciales.

3.2 Conceptos básicos.

Una vez visto por qué y cómo surgen y van evolucionando los satélites a lo largo de los años, se procederá a explicar los distintos aspectos de su funcionamiento.

Lo primero que hay que saber es que un satélite funciona recibiendo una señal (a grandes rasgos una señal no es más que un impulso electromagnético moldeado o manipulado por el emisor de tal forma que contenga información que el receptor entienda) de una estación situada en la superficie terrestre. Al recibir dicha señal el satélite o bien la refleja hacia otro punto de la Tierra o bien la tramita y genera una señal distinta en respuesta al mismo o a otro u otros puntos de la Tierra.



Figura 3: Comunicaciones por satélite (esquema básico) [12]

A pesar de ser una explicación muy superflua, es bastante ilustrativa y fácil de entender. No obstante, se ahondará más en el tema y en concreto en algunos de sus puntos clave en este capítulo.

Uno de estos puntos clave es el concepto de satélite y todo lo que lo engloba. Y la primera pregunta que debemos hacernos es:

3.3 ¿Qué es un satélite?

No sería de extrañar que, al hablar con alguien sobre satélites, esta fuese la primera pregunta que se le viniera a la cabeza. Según la RAE (Real Academia Española) un satélite es “un cuerpo celeste opaco que solo brilla por la luz reflejada del Sol y gira alrededor de un planeta primario” como por ejemplo La Luna que es un satélite de La Tierra o Fobos de Marte, pero no es esta la definición que nos interesa, pues nosotros vamos a hablar de otro tipo de satélites: los artificiales.

La RAE define un satélite artificial como “un vehículo tripulado o no que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y retransmitirla”.

Poner un “vehículo” a girar alrededor de la tierra a priori parece una idea descabellada. Durante años lo fue, pero tras décadas de investigación y varios intentos fallidos, se logró poner el primer satélite en órbita, acontecimiento que fue seguido de otros, como “El primer hombre en La Luna”. Poco a poco este sector se fue desarrollando y hoy en día la gente no se escandaliza ante la idea de que “una pelota de metal” gire alrededor de nuestro planeta. Pero no conviene olvidar que poner un satélite en órbita es un trabajo de ingeniería tremendo y, además muy costoso, del orden de varios miles de millones de euros.

Y a tan alto coste, ¿resultan rentables? La respuesta es sí, pues desempeñan muchas y muy útiles funciones, algunas de las cuales varias no serían factibles de no ser por los satélites. Las más destacables son las siguientes:

- **Difusión de televisión.** Resulta muy interesante la idea de abastecer una amplia zona de un servicio tan básico como es la televisión (hasta 1/3 de la superficie terrestre con satélites en órbita geoestacionaria, tema que veremos en detalle más adelante) y algunos canales aprovechan esta situación.
- **Geolocalización y navegación.** Sirven para determinar la posición exacta del usuario. Haciendo uso de aplicaciones que integren mapas, esto puede ser extremadamente útil. Un ejemplo es lo que conocemos como GPS, o el futuro sistema que se prevé sustituirá a GPS, Galileo.

- **Transmisión de voz y datos.** La telefonía fija o móvil (con su correspondiente servicio de datos) como la conocemos típicamente no funciona por satélite. No obstante, hay casos en los que alguien necesita hacer uso de este servicio en zonas inhóspitas de la Tierra.
- **Exploración terrestre.** Algunas de las cosas que se saben de nuestro planeta, incluidas las distintas capas de la atmósfera, han sido descubiertas gracias al uso de satélites. Incluso hoy en día se utilizan para prever catástrofes naturales, o al menos intentarlo pues es un área en investigación. Un claro ejemplo es el **servicio meteorológico**, que se utiliza para anticipar el tiempo que habrá en los días futuros.
- **Exploración espacial.** Este caso es más extremo que el anterior, pues son muchas las cosas del espacio las que se desconocían antes del uso del satélite para su observación. También hay radioaficionados que hacen uso de estos satélites tan solo a rango de hobby.
- **Espionaje.** No son pocos los satélites de uso militar que se encuentran en órbita. Algunos de sus usos son las comunicaciones y el espionaje (observando las zonas de interés). Sin embargo, como es normal, se sabe poco acerca del uso que los militares hacen de sus satélites, así como del número o localización de ellos.
- **Anti satélite.** Otro de los usos que los militares les dan es el de destruir satélites enemigos. Algunos usan proyectiles cinemáticos, mientras que otros usan armas de energía o partículas o misiles balísticos.
- **Estaciones espaciales.** Son estructuras que orbitan alrededor de la Tierra y diseñadas para que los seres humanos puedan “vivir” en ellas, es decir, que puedan pasar largos períodos de tiempo en ellas, haciendo investigaciones largas por ejemplo. Se caracterizan por no tener propulsión ni capacidad de aterrizar. Un claro ejemplo es la ISS (*International Space Station*).

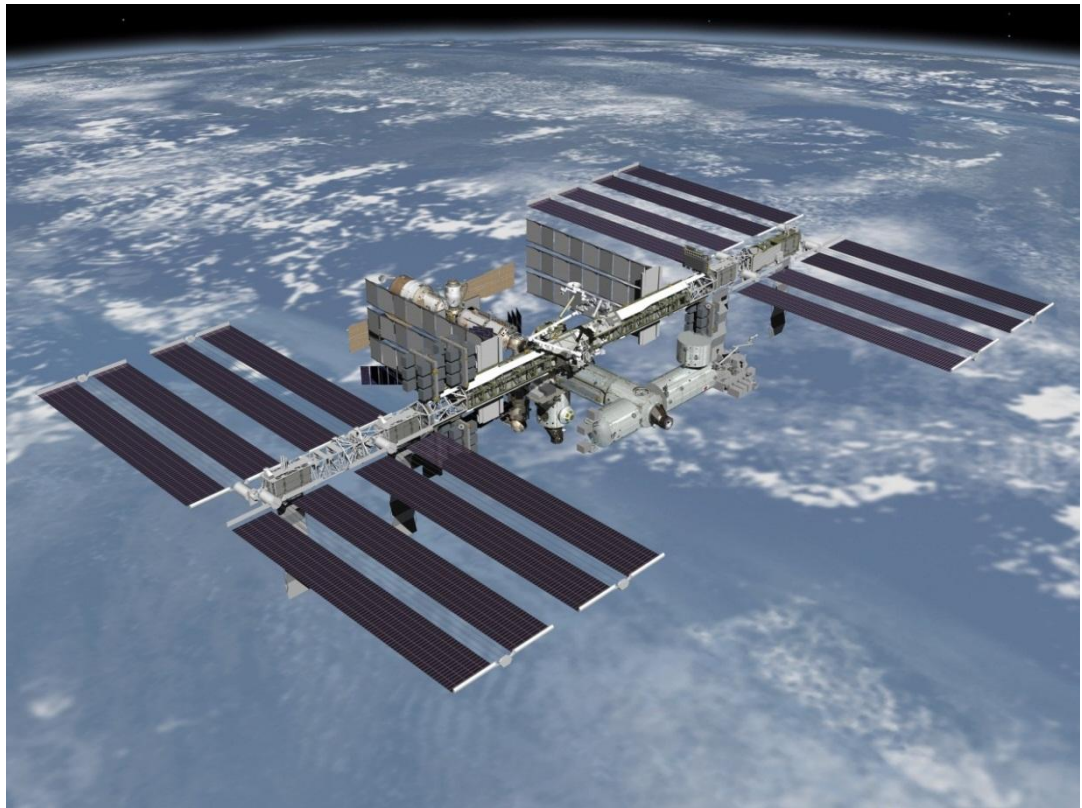


Figura 4: International Space Station [13]

3.4 Estructura de los satélites

No son pocas las funciones que tiene un satélite. En este apartado se verá qué herramientas utilizan para poder llevarlas a cabo. O dicho de otra forma, de qué están hechos los satélites.

Pero previamente, es importante destacar que cualquier sistema espacial consta de un segmento terreno y un segmento espacial.

El segmento espacial lo componen el satélite y las estaciones TT&C (*Telemetry, Tracking and Command*), cuya misión consiste en comunicarse con este para que se mantenga en su posición orbital mientras que el segmento terreno está compuesto por todas las estaciones implicadas en el enlace de comunicación y que estén localizados en la Tierra. Podemos ver el esquema en la siguiente imagen:

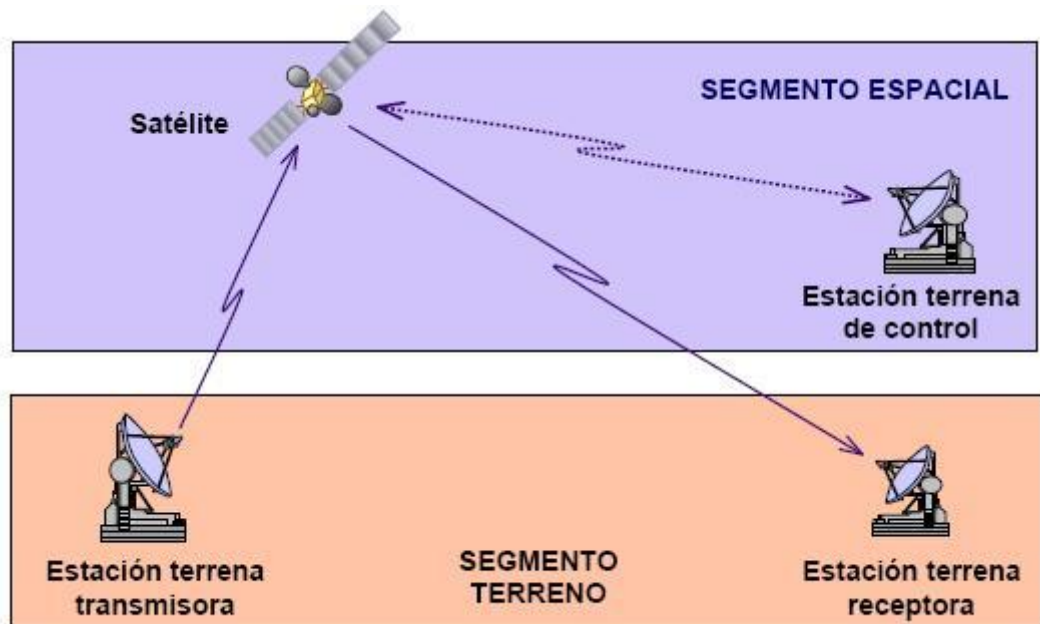


Figura 5: Segmentos espacial y terreno [14]

Aunque todos los elementos son imprescindibles, el satélite juega un papel clave. Este consta de dos partes subdivididas a su vez, que son: la **plataforma** y la **carga útil**.

La plataforma consta de distintos sistemas:

- **Soporte mecánico:** es lo que le da estructura al satélite, la carcasa que encierra y protege todo lo demás. Realiza una función imprescindible especialmente durante el lanzamiento y la puesta en órbita.
- **Sistema de suministro de energía:** Asegura el funcionamiento de los demás sistemas. Usa paneles solares con los que genera energía, pero

también tiene baterías que se van cargando para descargarse en los momentos en los que las placas no reciben luz del Sol, es decir, en los eclipses (tema en el que se profundizará más adelante).

- **Sistema de comunicaciones:** lo forman un conjunto de antenas y transmisores para poder comunicarse con las estaciones de seguimiento, enviando datos recabados y recibiendo instrucciones. Estas son procesadas por el **sistema de control**, que es el ordenador principal del satélite. Se podría decir que estos dos sistemas son “el intermediario” entre las estaciones de Tierra y los demás sistemas del satélite.

Las antenas utilizadas pueden ser de distintos tipos:

- Antenas de hilo: suelen utilizarse cuando se pretende transmitir omnidireccionalmente. En comunicaciones vía satélite se utilizan las helicoidales sobre todo en recepción desde la Tierra para UHF (*Ultra High Frequency*).
 - Antenas de apertura o bocinas: son de tipo directivo y muy útiles para dar coberturas amplias, por ejemplo para satélites en órbita geoestacionaria.
 - Antenas planas: son antenas que no necesitan un apuntamiento muy preciso aunque sí, lógicamente, una orientación hacia la fuente emisora. Al juntar dos o más antenas de este tipo se consiguen las Antenas de Array, que son muy útiles porque ofrecen la posibilidad de adaptarlas para gran diversidad de aplicaciones.
- **Sistema de posicionamiento:** en pos a las directrices almacenadas y a las instrucciones recibidas desde Tierra, mantiene el satélite en su posición orbital y lo orienta hacia sus objetivos. Para realizar esta tarea se ayuda de la estación TT&C citada anteriormente, a la que le envía parámetros de posicionamiento y orientación para que esta le envíe correcciones. También se vale de propulsores para modificar su posición.
 - **Sistema de control térmico:** se provee al satélite de un blindaje térmico para que pueda hacer frente a los cambios bruscos de temperatura a los que es sometido. Esto le da ese aspecto dorado tan característico a algunos satélites. Además, es destacable el hecho de que no todos los componentes tienen los mismos márgenes de temperatura. Por

ejemplo, las baterías deben estar entre 0°C y 20°C, mientras que la temperatura de las antenas puede oscilar entre los -150°C y los 80°C.

Carga útil: varía según la finalidad del satélite. Son el conjunto de instrumentos necesarios para llevar a cabo las tareas asignadas al satélite. En los satélites destinados a comunicación esos instrumentos son antenas (tales como las mencionadas anteriormente) y **transpondedores**.

Esta palabra viene de la fusión de otras dos: *Transmitter* (Transmisor) y *Responder* (Respondedor). Y es que esa es su función. Algunos transpondedores simplemente reciben señales de interrogación y en pos a estas generan respuestas automáticas, ya sean predeterminadas o no.

No obstante, los transpondedores que más impacto tiene en las comunicaciones por satélite son los que se encargan de recibir una señal, amplificarla y transponerla (cambiarle la frecuencia) para luego enviarla a un punto distinto de la Tierra.

Existen dos tipos de transpondedores:

- Pasivos: son aquellos que son identificados por escáneres, tales como las tarjetas de crédito. No poseen alimentación y por ello su alcance es muy limitado.
- Activos: toda cadena de elementos conectados en serie en un canal que modifican y adecuan la señal recibida para luego emitirla.

El esquema de un transpondedor transparente tiene esta pinta:

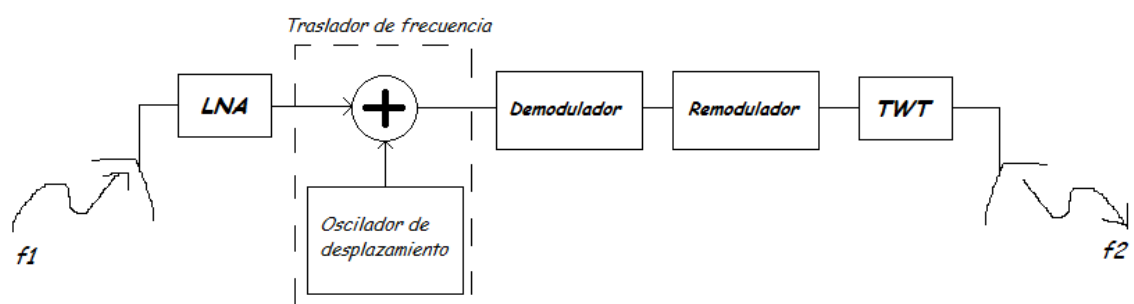


Figura 6: Transpondedor regenerativo

La señal se recibe en una frecuencia y se la hace pasar por un Amplificador de Bajo Ruido (LNA) que amplifica señales débiles y minimiza el ruido introducido por la alimentación para modificar su frecuencia a una frecuencia más baja. Esto ocurre siempre así porque a menor frecuencia menor potencia consumida y la disponibilidad

de energía en un satélite es limitada, en cambio en la Tierra no tanto. Tras esto, la señal se demodula y se vuelve a modular (se regenera), bien con la misma modulación o con una diferente. Finalmente la señal se ve amplificada al atravesar un Tubo de Ondas Progresivas (TWT) para reenviarse de vuelta a la Tierra.

Los transpondedores transparentes funcionan de la misma manera con la salvedad de la modulación y la demodulación.

El segmento terreno está formado por la estación emisora y la estación receptora, en la mayoría de casos. En ocasiones pueden intervenir más elementos. A veces la estación emisora y receptora son la misma estación; esto depende de la utilidad que se le dé al satélite.

El funcionamiento de estas estaciones será análogo al del satélite. Estas usan antenas tales como las mencionadas anteriormente. Y también usan amplificadores de bajo ruido en recepción, convertidores de frecuencia (aunque en “dirección” inversa), moduladores, demoduladores, etc. También tendrán un sistema de control desde el cual harán el seguimiento y, en caso necesario, enviarán instrucciones al satélite.

3.5 Bandas de frecuencia utilizadas

Para que las estaciones terrestres y el satélite puedan comunicarse, además de todos los elementos que se han citado, será necesario disponer de algunas bandas del espectro radioeléctrico. Se pueden ver en la siguiente tabla, sacada de este enlace:

[http://wikitel.info/wiki/Sistemas de radiodifusi%C3%B3n por satelite](http://wikitel.info/wiki/Sistemas_de_radiodifusi%C3%B3n_por_satelite)

Banda	Rango frec. UPLINK (Ghz)	Rango frec. DOWNLINK (Ghz)	Uso típico
L	1.530 - 2.700	1.530 – 2.700	Móvil (marítimo, terrestre y aeronáutico)
S (2 – 4 GHz)	2.700 – 3.500	2.700 – 3.500	Móvil / Reservado (TT&C)
C (6/4 GHz)	5.925 – 6.425	7.250 -7.745	Fijo / DBS
X (8/7)	7.900 – 8.395	7.250 -7.745	Militar/Gubernamental
Ku (14/12)	14.000 – 14.800	10.700 – 11.700 12.500 – 12.750	Fijo
Ku (17/12)	17.300 – 18.100	11.700 – 12.500	DBS
Ka (30/20)	27.5 – 30.0	17.7 – 21.2	Enlaces entre satélites. Investigación

Tabla 3: Bandas de frecuencia

3.6 Órbitas

Esta palabra tiene varias acepciones, pero la que se refiere al tema a tratar, según la RAE, es: “la órbita es la trayectoria que, en el espacio, recorre un cuerpo sometido a la acción gravitatoria ejercida por los astros”.

En este caso el cuerpo será un satélite, que describirá una elipse alrededor del astro, La Tierra, que estará situado en uno de los focos de dicha elipse. Ocurre que a veces una órbita es tan cerrada que la elipse se torna en círculo.

Un concepto interesante es el de **período orbital**, que será clave para un tipo de órbita. Es el tiempo que tarda un planeta u otro objeto en realizar una órbita completa.

Otro concepto que está fuertemente relacionado es el **efecto Doppler**, que es el aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Este efecto solo tiene repercusiones

importantes cuando la velocidad de movimiento de la fuente es significativa con respecto a la de propagación de la onda. Aunque viéndolo desde La Tierra pueda parecer que no, los satélites viajan a velocidades altísimas y es por esto que este efecto adquiere importancia.

Los **eclipses** están muy relacionados con las órbitas. Se explican más adelante

La órbita es uno de los parámetros más característicos de un satélite y existen varias clasificaciones (por distancia, inclinación, forma, sincronía, cuerpo central, etc.). Sin embargo, en telecomunicaciones la clasificación más útil es la que define varios tipos en pos a la distancia. Los tipos más característicos que ofrece esta clasificación son:

- **Órbita Geoestacionaria (GEO):** Está situada a 35848 Km de altura desde la superficie terrestre. Su latitud es de 0 grados, es decir, está situada sobre el Ecuador. Su período orbital es de 23 h, 56 min y 4.1 seg y por lo tanto estará siempre sobre la misma posición relativa respecto a la Tierra. Esto quiere decir si apuntásemos con un telescopio lo suficientemente potente a un satélite en órbita GEO lo veríamos siempre sin necesidad de mover el telescopio. Al estar a tanta altura, es muy grande el área que se puede cubrir. De hecho, tan solo son necesarios 3 – 4 satélites para dar cobertura a todo el planeta. Sin embargo nunca serán capaces de cubrir los polos. Por el contrario, al estar tan alejados de La Tierra, poseen un retarde de unos 0.25 seg.

Sus aplicaciones principales son las comunicaciones, especialmente la difusión de televisión por satélite.

- **Órbita Terrestre Media (MEO):** los satélites en esta órbita se encuentran a una altura de entre 10075 y 20150 Km. A diferencia de los GEO su posición relativa respecto a la Tierra no es fija. Debido a su menor altitud se necesitarán más satélites para cubrir la superficie terrestre, pero por contra se reduce la latencia del sistema de forma significativa. En la actualidad se utilizan casi exclusivamente para sistemas de posicionamiento, tales como GPS o Galileo.
- **Órbita Terrestre Baja (LEO):** se halla por debajo de los 5035 Km pero la mayoría de satélites LEO se encuentran mucho más abajo, entre los 600 y los 1600 Km. A tan bajas alturas, la latencia es casi despreciable (centésimas de segundo) y los satélites podrán emitir a menor potencia pero también cubrirán regiones más pequeñas que los GEO y por tanto serán necesarios muchos más satélites para cubrir todo el planeta.

Su período orbital es de unos 100 minutos, lo que requerirá múltiples *handover* (cambio de conectividad de un satélite a otro).

Se distinguen tres tipos de satélites LEO según la cantidad de ancho de banda que manejen. Dependiendo de esto, tendrán unas aplicaciones u otras. Algunas son: servicios de telefonía móvil, transferencia de datos, buscar personas o suministro de Internet.

Estas no son las únicas órbitas existentes, pero sí las más utilizadas. Se pueden apreciar en la siguiente imagen:

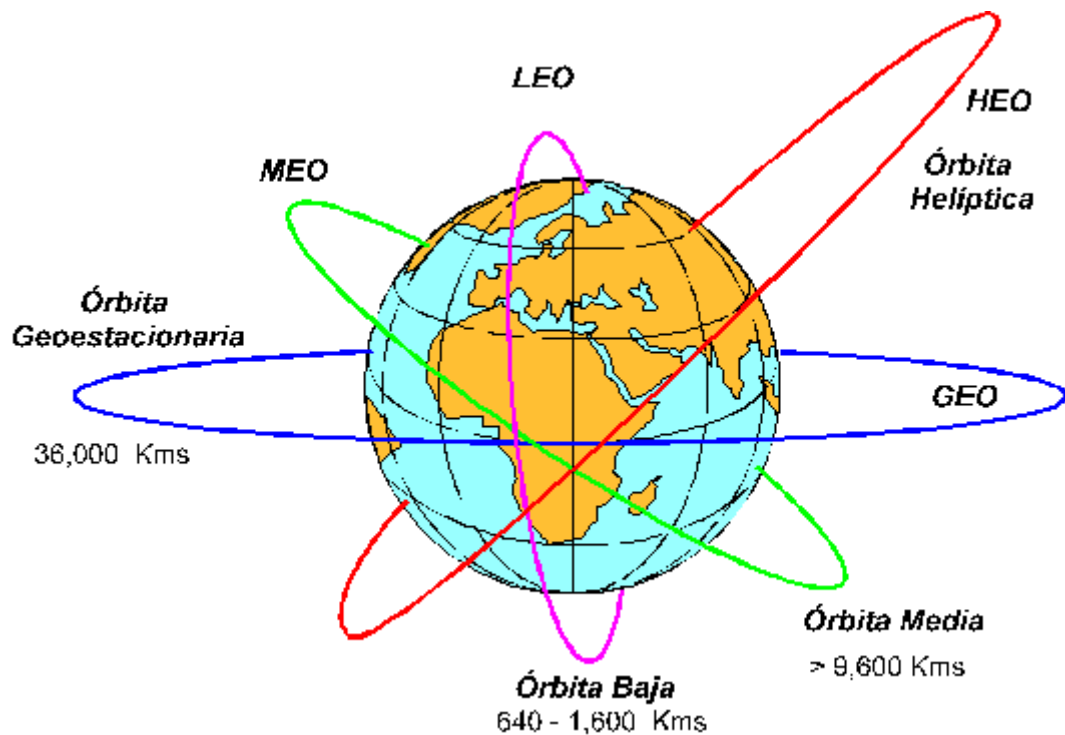


Figura 7: Tipos de órbitas [15]

Las órbitas más importantes son la más alta y la más baja (GEO y LEO). Ambas presentan características muy dispares y quizás esto es lo que las hace tan interesantes, que haciendo uso de una y otra se puede ofrecer multitud de servicios. Resulta por ello interesante realizar una comparación cualitativa, que se puede apreciar en esta tabla:

	Satélites GEO	Satélites LEO
Número de satélites	3 ó 4	10n ($4 \leq n \leq 10$)
Retardo	250 ms	Pocos ms
Cobertura	Total excepto polos	Total
Efecto Doppler	No	Grande
Satélite	Grande y complejo	Pequeño
Segmento terreno	Grande, más sencillo	Pequeño, más complejo
Coste	Más bajo	Más alto

Tabla 4: Comparación entre órbitas

3.6.1 Eclipses

El eclipse es un fenómeno que tiene lugar cuando la luz procedente de un cuerpo celeste es bloqueada por otro, normalmente llamado cuerpo eclipsante.

En el caso de los satélites GEO, debido a su período orbital y a que la órbita se encuentra en el plano ecuatorial, sufrirán eclipses de manera periódica. Es por eso que hay que tenerlo muy en cuenta y tomar medidas.

Hay dos tipos de eclipses a tener en cuenta:

- **Eclipse satelital:** La Tierra o la Luna se interpone entre el Sol y el satélite y lo cubre por completo. Tienen dos efectos:
 - Por un lado las placas fotovoltaicas del satélite dejan de recibir luz del Sol, con lo que dejan de cargarse. Para ello se les incorporan baterías para hacer frente al consumo que sea necesario en este período. Además, se suelen colocar los satélites al Oeste del meridiano de tal modo que el eclipse con la Tierra tenga lugar en horas de madrugada, cuando es menor la cantidad de comunicaciones requeridas.

- Por otro lado se alcanzan temperaturas de hasta -200°C . El satélite tiene que emplear la energía almacenada para mantener una temperatura a la que sus componentes no sufran daños. Esto supone un gasto extra de energía. Para ello, el satélite tiene un sistema de control térmico.
- **Eclipse de Sol:** tiene lugar en el caso inverso, es decir cuando el satélite queda alineado y entre el Sol y la Tierra. En este tipo de eclipses no existen problemas de energía, sino que el satélite se vuelve “invisible” desde la Tierra. El Sol emite mucha radiación, que se superpone a la señal del satélite de tal modo que las antenas receptoras en Tierra no pueden captar dichas señales. Es decir, durante estos eclipses hay un corte en el servicio.

En esta imagen se pueden observar los dos tipos de eclipse:

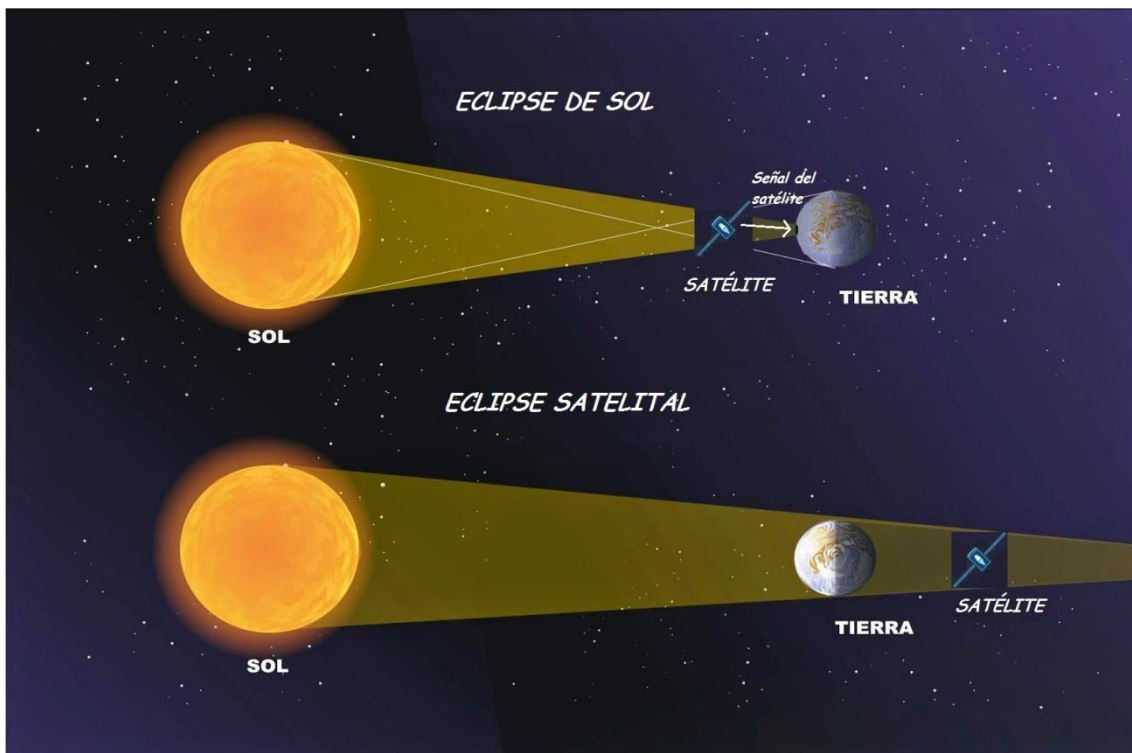


Figura 8: Eclipse de Sol y satelital [16]

3.7 Acceso múltiple

Cualquier satélite debe poseer la capacidad de comunicarse con muchas estaciones terrenas simultáneamente. Esto recibe el nombre de acceso múltiple, cuyo propósito compartir los recursos de comunicación para hacer esto posible. Además, es deseable que al hacerlo no haya interferencias entre canales.

Las técnicas de acceso múltiple más conocidas son:

- FDMA: *Frequency Division Multiple Access*
- TDMA: *Time Division Multiple Access*
- CDMA: *Code Division Multiple Access*
- SDMA: *Space Division Multiple Access*

3.7.1 FDMA. Acceso múltiple por División de Frecuencia

En esta técnica de acceso múltiple se divide el espectro disponible en bandas de frecuencia y se asigna una para cada usuario (estación terrena) haciendo posible comunicarse durante todo el tiempo. Para reducir la interferencia entre usuarios de canales adyacentes se dejan bandas de guarda. Esto es necesario debido a la imposibilidad de construir filtros ideales.

Dado que la no linealidad del transpondedor es el motivo principal de la interferencia entre usuarios, el tubo amplificador de onda viajera funciona por debajo de su capacidad. En consecuencia, la eficiencia de potencia en FDMA se ve reducida debido al margen de potencia necesario para que funcione sin saturar.

3.7.2 TDMA. Acceso múltiple por División de Tiempo

TDMA funciona de manera análoga a FDMA pero en tiempo, es decir, el tiempo se divide en ranuras y cada usuario se aloja en una de ellas. Al igual que en el caso anterior, es necesario dejar ranuras de tiempo en las que ni se transmite ni se recibe para evitar colisiones.

De este modo, cada usuario dispondrá de todo el ancho de banda durante el lapso de tiempo que transmita o reciba. Esto permite que varios usuarios compartan una banda de frecuencia. En esta técnica la eficiencia de potencia es casi total, lo que es una ventaja frente a FDMA.

Presenta el inconveniente de que requiere una sincronización estricta entre emisor y receptor.

3.7.3 CDMA. Acceso Múltiple por División de Código

CDMA es una técnica de acceso múltiple de espectro ensanchado. Esto es así porque la señal se emite con un ancho de banda mucho mayor que el requerido por los datos a enviar.

Cada usuario emplea un código de transmisión distinto y único para modular su señal. En la siguiente imagen se puede ver el esquema:

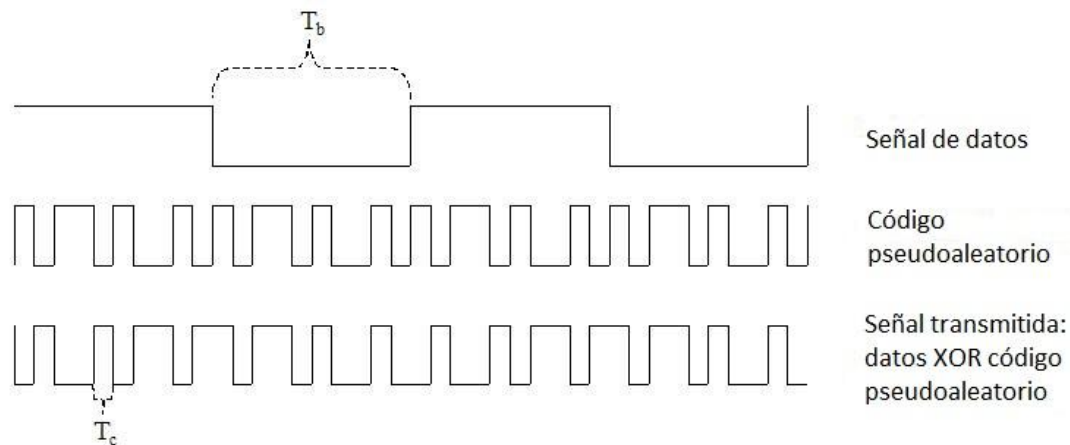


Figura 9: Generación de señal CDMA [17]

La selección de los códigos a emplear por los distintos usuarios es vital, pues de la correlación que exista entre ellos dependerá la distinción de la señal del usuario de interés de las del resto de usuarios.

En la práctica existen ciertas limitaciones para el uso del espectro ensanchado, pero las señales son más difíciles de interceptar y seguras, pues las señales van codificadas por códigos únicamente conocidos por emisor y receptor, por lo que es de uso militar.

3.7.4 SDMA. Acceso Múltiple por División del Espacio

Se utilizan distintas antenas para segmentar el espacio en sectores haciendo uso de antenas direccionales. De este modo, diferentes usuarios pueden acceder al satélite simultáneamente en la misma frecuencia o en la misma ranura de tiempo.

Es compatible con cualquiera de las otras técnicas de acceso múltiple, es fácil de implementar e incrementa la capacidad por kilómetro cuadrado.

3.8 Multiplexación

La multiplexación es la combinación de dos o más fuentes de información y transmitir las sobre un mismo canal físico mediante un dispositivo llamado multiplexor. El proceso inverso se llama demultiplexación. Se puede observar el esquema en la siguiente imagen:

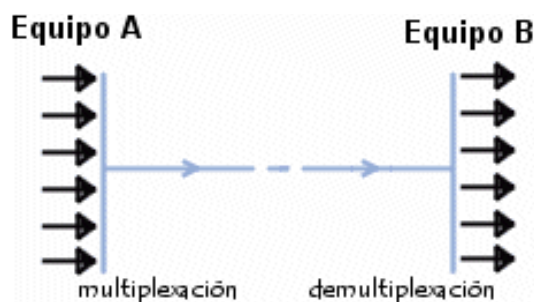


Figura 10: Multiplexación y demultiplexación [18]

El objetivo de esto es compartir la capacidad de transmisión de datos de un enlace para aumentar su eficiencia y minimizar así la cantidad de líneas físicas requeridas y maximizar el uso del ancho de banda disponible.

El acceso múltiple, explicado anteriormente, es un caso que se da cuando existe un protocolo o esquema de multiplexación orientado a que varios usuarios compartan un medio físico de transmisión.

Los tipos de multiplexación más utilizados son:

- FDM (WDM): *Frequency (Wavelength) Division Multiplexing*
- TDM *Time Division Multiplexing*
- CDM: *Code Division Multiplexing*

3.8.1 FDM. Multiplexación por División de Frecuencia

Se utiliza generalmente en sistemas de comunicación analógica. Se parte de varias fuentes cuyas señales están a la misma frecuencia. Se convierte cada una de ellas a una banda distinta de frecuencia y se transmiten todas ellas al mismo tiempo por un solo medio de transmisión.

En recepción se deshace el cambio de frecuencias recuperando así la señal original.

Cuando el medio de transmisión es fibra óptica, diodos láser o cualquier medio que utilice la luz para transmitir se habla de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM) que funciona de manera análoga a FDM.

El esquema de funcionamiento se puede ver en la siguiente imagen:

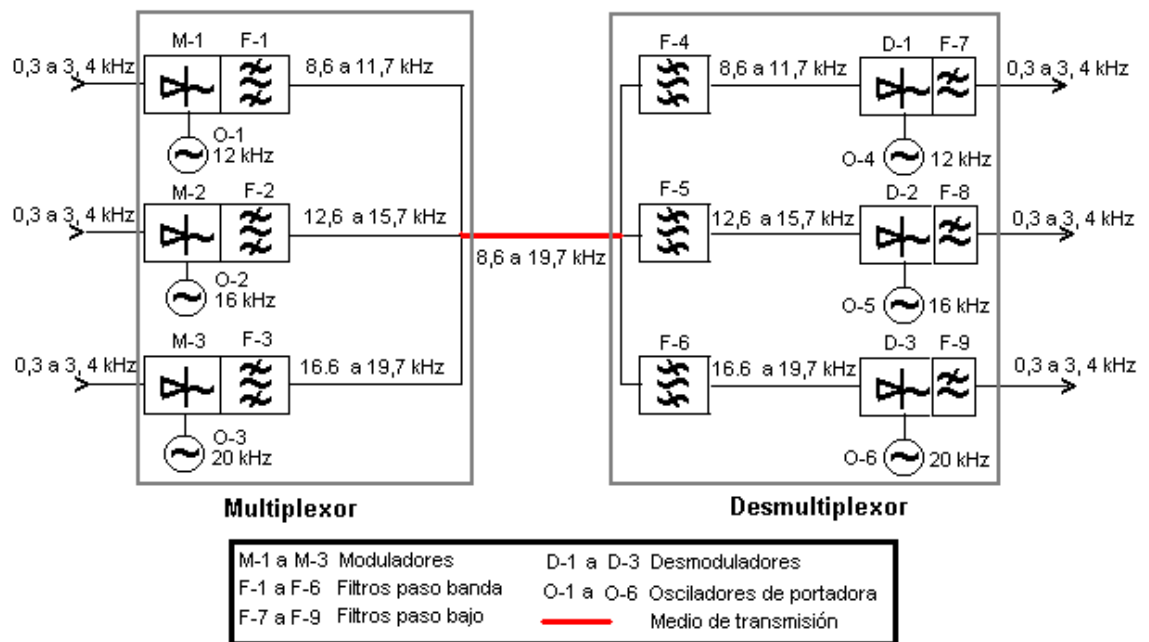


Figura 11: Esquema de funcionamiento FDM [19]

3.8.2 TDM. Multiplexación por División de Tiempo

Es el tipo de multiplexación más utilizado en transmisión digital actualmente. El ancho de banda se asigna a cada canal durante una fracción del tiempo total. Se consigue aprovechar así todo el ancho de banda disponible.

TDMA es la técnica de TDM más extendida.

El funcionamiento es sencillo, pero requiere sincronización. Se puede observar en la siguiente imagen:

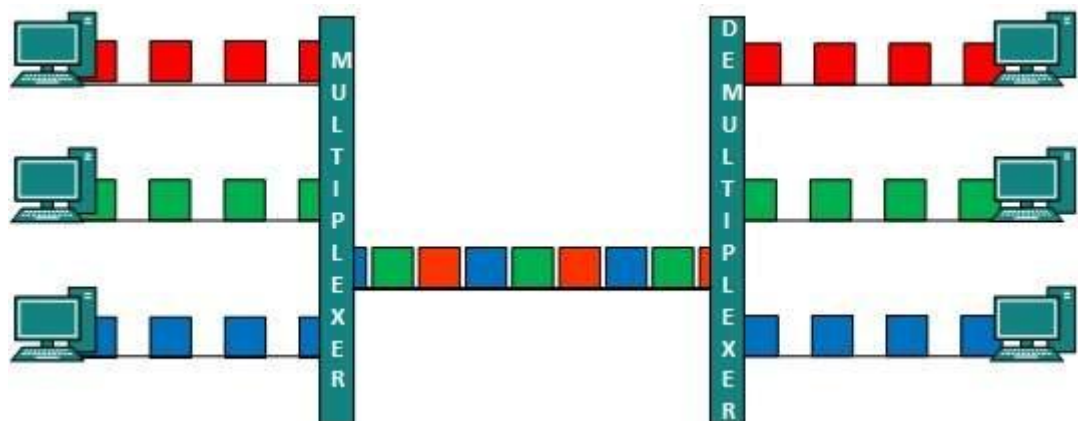


Figura 12: Esquema de funcionamiento TDM [20]

3.9 Modulaciones

Anteriormente ha aparecido el concepto de modulación, pero ¿qué es?

Modular es el conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora. Según la *American National Standard for Telecommunications*, "la modulación es el proceso o resultado del proceso de variar una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información".

Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora varíe en pos a las variaciones de la señal de datos.

Lo que se consigue con esto es un mejor aprovechamiento del canal, lo que permite transmitir más información en forma simultánea, es decir que donde enviando la señal de datos plana enviamos 1 bit de información, al modularla se enviarán N bits, dependiendo del tipo de modulación. Y además, mejora la resistencia de la señal contra posibles ruidos e interferencias.

Se pueden modular señales analógicas y digitales. Dentro de esta clasificación se pueden distinguir otros tipos de modulación según el parámetro modificado:

- Modulaciones Analógicas:
 - Modulación de la Amplitud (AM o Amplitud Modulada)
 - Modulación de la Frecuencia (FM o Frecuencia Modulada)
 - Modulación de la Fase (PM o Fase Modulada)
- Modulaciones Digitales:
 - Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK)
 - Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK)
 - Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK)

Estos son los tipos básicos de modulación, pero existen algunos que son mezcla de varios de ellos, como por ejemplo la modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM). Esta junto con las modulaciones BPSK (PSK Binaria) y QPSK (PSK Cuadrafásica, también conocida como 4-QAM) son las más utilizadas en comunicaciones por satélite.

3.10 Sistemas VSAT

Una vez que se han visto los puntos clave en las comunicaciones por satélite en general, se va a profundizar en los sistemas VSAT, que es en lo que se enfoca este Trabajo Fin de Grado.

3.10.1 Breve Historia

En 1979, la Compañía de Comunicaciones Ecuatoriana comenzó ofreciendo una conexión de sentido único desde un Hub en Mountain View (California) hasta varios VSAT's en EEUU. Fue el primer enlace VSAT, y utilizaba la banda C y técnicas de espectro ensanchado para evitar interferencias.

Tan solo dos años más tarde, la misma compañía diseñó una red VSAT bidireccional capaz de enviar datos desde los VSAT's al Hub.

En EEUU se instalaron redes VSAT para transmisión de voz, datos y vídeo, pero en Europa el desarrollo fue mucho más tardío. No obstante, según datos recientes, hay más de 40 redes y 6000 terminales VSAT operando a través del sistema HISPASAT, que es uno de los que mayor número de redes VSAT soporta en Europa.

3.10.2 Definición y características

Los sistemas VSAT (Terminal de Apertura Muy Pequeña) son redes de comunicación por satélite que permiten establecer enlaces entre un gran número de estaciones remotas con antenas de pequeño tamaño (menores de 2.5 metros de diámetro, típicamente de 1.3), de ahí el nombre, con una estación central conocida normalmente como Hub. La comunicación suele darse siempre en el mismo sentido, desde el Hub hacia los terminales VSAT, aunque también existe la posibilidad de hacerse en sentido contrario. En este tipo de comunicaciones el satélite hace de repetidor. Las bandas de frecuencia más utilizadas son las bandas C, Ku y Ka, que son más susceptibles a las condiciones meteorológicas cuanto mayor es la frecuencia de la portadora.

Por tanto, el segmento espacial lo constituirá el satélite. La gran mayoría de sistemas VSAT utilizan satélites geoestacionarios (a unos 36000 Km de altitud). La función que desempeñan es sencilla: reciben una señal a una frecuencia y la retransmiten en otra. Es muy sencilla pero también es crucial.

El Hub y los terminales VSAT formarán el segmento terreno. El Hub es la estación central de una red VSAT y tan solo es una estación más dentro de la red pero más grande, de hecho la antena es del orden de 15 metros de diámetro y maneja valores mayores de potencia de transmisión. Los terminales VSAT son mucho más sencillos y para su configuración hay que tener en cuenta la cantidad de tráfico que va

a generar y el tipo de red al que va a pertenecer. Uno de los puntos clave es el apuntamiento de la antena hacia el satélite. Se hace en base a los ángulos de elevación y azimut (que se verán más adelante) y una vez el apuntamiento es correcto, este se refina para que la potencia recibida sea la mayor posible.

En la siguiente imagen se puede ver el esquema de funcionamiento:

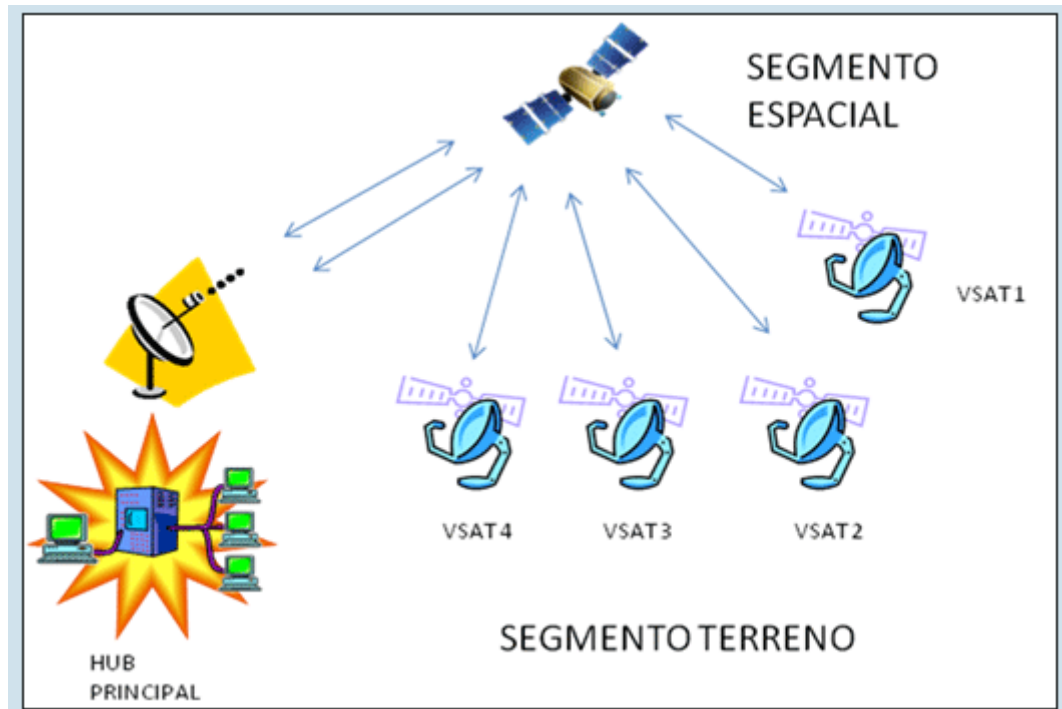


Figura 13: Sistema VSAT [21]

Las ventajas que presentan las redes VSAT frente a otras son:

- Fácil adaptabilidad a las necesidades de cada usuario.
- Facilidad de reconfiguración y ampliación. Si se añadiera o moviese un terminal VSAT lo único que habría que hacer es orientar la antena hacia el satélite.
- Gran fiabilidad, pues se suelen diseñar para tener una disponibilidad en torno al 99% del tiempo y con una BER muy baja.
- Bajo coste. Esto tiene matices, pues el precio en comunicaciones nunca es bajo y de hecho la inversión inicial es muy elevada, pero se debe tener en cuenta que algunos de los servicios que se ofrecen son los de dar cobertura a zonas en las que resulta imposible o muy poco rentable cablear (tales como montañas o barcos).

Las principales desventajas de este tipo de redes vienen de la mano del hecho de que suelen utilizar satélites geoestacionarios. Por un lado, hay un retardo en la

señal de medio segundo que resulta muy problemático para algunas aplicaciones. No hay solución para ello. Por otro lado, al usar un satélite GEO como repetidor, cualquier usuario no autorizado puede interceptar la señal. Una posible solución es encriptar la información.

Las aplicaciones de las redes VSAT son muchas y se clasifican en dos: las de enlace unidireccional y las de enlace bidireccional. Algunas del primer tipo son la educación a distancia, difusión de noticias o publicidad. La videoconferencia de baja calidad, la televisión corporativa o transacciones bancarias son algunas de las aplicaciones que requieren un enlace bidireccional.

Además, algunas fuerzas militares hacen uso de este tipo de redes. El Hub se sitúa cerca del cuartel general y los VSAT distribuidos entre los pelotones del frente. Utilizan la banda X.

3.10.3 Topologías de red VSAT

Hay dos tipos de configuraciones de redes VSAT: en malla y en estrella.

- **Malla:** todos los terminales VSAT deben poder establecer conexión con otro terminal a través del satélite. Mediante estudio se llegó a la conclusión de que la mejor técnica de acceso era FDMA bajo demanda, que es la que utilizan las redes comerciales en malla.

En la siguiente imagen se puede ver cómo es una red VSAT en malla:



Figura 14: Red VSAT en malla [22]

- **Estrella:** Estas redes están compuestas por un número determinado de VSAT's y un hub. En ellas, los terminales tan solo se pueden conectar con el nodo central (el hub), que gestiona todos los canales. Esta

topología se puede dar tanto en redes bidireccionales como unidireccionales. En ellas, el ancho de banda se divide en dos tipos de enlace:

- *Inbound*: son los enlaces desde los terminales hacia el hub. En cuanto a las técnicas de acceso, la solución más habitual es la utilización de FDMA y TDMA.
- *Outbound*: enlaces desde el hub hacia los terminales VSAT. Las técnicas de acceso podrían ser FDMA, ya que el hub multiplexa en frecuencia y TDM.

En la siguiente imagen se puede ver una topología en estrella:

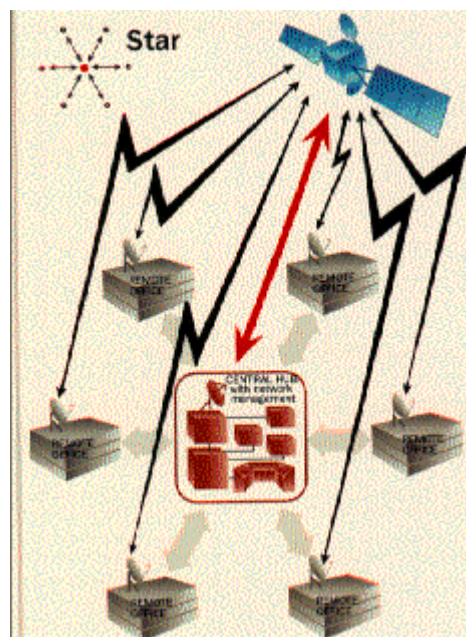


Figura 15: Red VSAT en estrella [23]

3.11 Formulación para el cálculo de la cobertura y balance de enlace en un sistema VSAT

Para hacer cálculos de un sistema VSAT es imprescindible diferenciar entre enlace *inbound* y enlace *outbound*. Como se ha explicado en el apartado anterior, el enlace *inbound* es el que va desde el hub hacia los terminales VSAT pasando por el satélite y el *outbound* desde los terminales VSAT hacia el satélite y de ahí al hub. Y además, hay que distinguir entre enlace de subida y enlace de bajada. De este modo tendremos cuatro tipos de enlace:

- Enlace *Inbound de subida*. VSAT → satélite
- Enlace *Inbound de bajada*. Satélite → Hub
- Enlace *Outbound de subida*. Hub → satélite
- Enlace *Outbound de bajada*. Satélite → VSAT

En la siguiente imagen se puede diferenciar un enlace de otro:

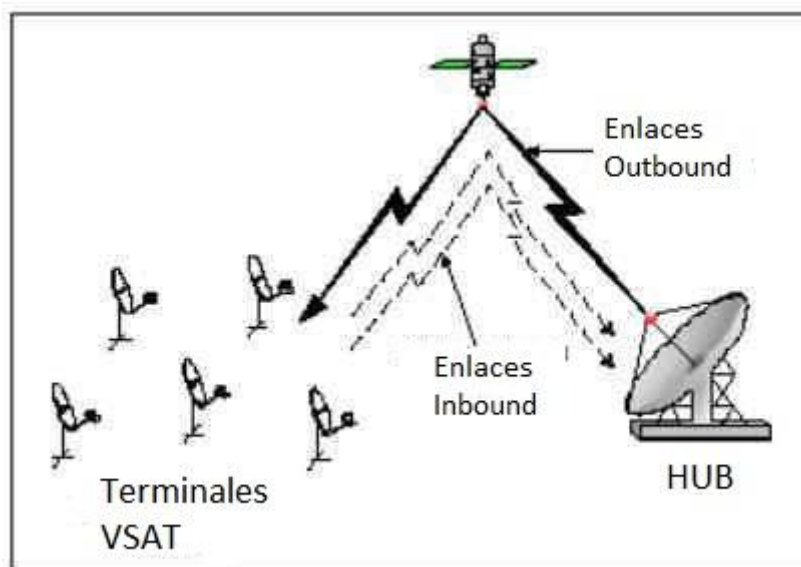


Figura 16 : Enlaces Inbound y Outbound [24]

Esta distinción es tan importante porque habrá que realizar cálculos para cada uno de ellos y además tendrán parámetros distintos.

También, por supuesto, resulta imprescindible distinguir entre VSAT, hub y satélite.

Estos tres elementos y estos cuatro tipos de enlace serán los puntos clave para realizar los cálculos.

Para cada elemento habrá diferentes datos. Los datos que se pueden tener para satélite, hub o terminal VSAT son los siguientes:

- Potencia de transmisión
- Ganancia de transmisión
- Pérdidas en transmisión
- Ancho de banda del transpondedor
- PIRE
- Ganancia en recepción
- Pérdidas en recepción
- Temperatura de ruido de la antena
- Diámetro de la antena
- Eficiencia de radiación de la antena
- Pérdidas de propagación
- IBO (Input Back-Off). Sólo para el satélite
- OBO (Output Back-Off). Sólo para el satélite
- Coordenadas (latitud y longitud)
- Altitud del satélite

También habrá datos relativos a los enlaces:

- Ancho de banda para cada tipo de enlace (Ib, Ob, subida y bajada)
- Frecuencias de transmisión de cada tipo de enlace
- Tasa binaria de transmisión para Ib y para Ob
- Modulación o codificación

No siempre serán facilitados todos estos datos, sino que habrá que calcular unos a partir de otros o se tomarán valores por defecto. Por ejemplo, si no se facilita un valor para las pérdidas en recepción, se asumirá que no las hay.

Para calcular la calidad del enlace, primero ha de haber cobertura geográfica. Esto quiere decir que un satélite situado sobre Australia nunca podrá dar cobertura a un hub o un VSAT en España.

3.11.1 Cobertura geográfica

Para comprobar que hay cobertura geográfica se hace uso de los *ángulos de elevación* y de *azimut*. Pero hay un concepto que conviene conocer previamente: el punto subsatélite:

- **Punto subsatélite:** si se uniera una línea entre el satélite y el centro de la Tierra, el punto de esa línea que quedase a la altura de la superficie terrestre sería el punto subsatélite.

En la siguiente imagen se puede apreciar este concepto:

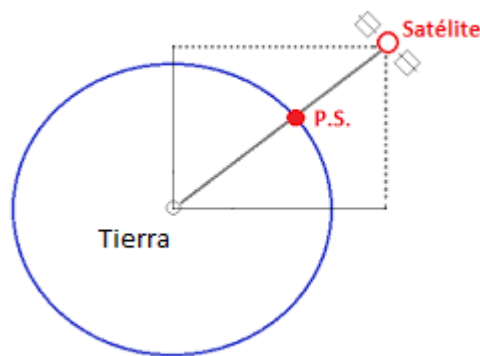


Figura 17: Punto subsatélite

- *Ángulo de azimut:* si se trazase una línea recta entre la estación terrena y el punto subsatélite, sería el ángulo que formarían el punto cardinal Norte de la estación hasta esta línea.
- *Ángulo de elevación:* denota el ángulo con el que se debe orientar la antena de la estación terrena para que "vea" al satélite. Sería el ángulo que queda entre dos líneas que uniesen la estación terrena con el punto subsatélite y con el satélite.

En la siguiente imagen se pueden apreciar estos ángulos:

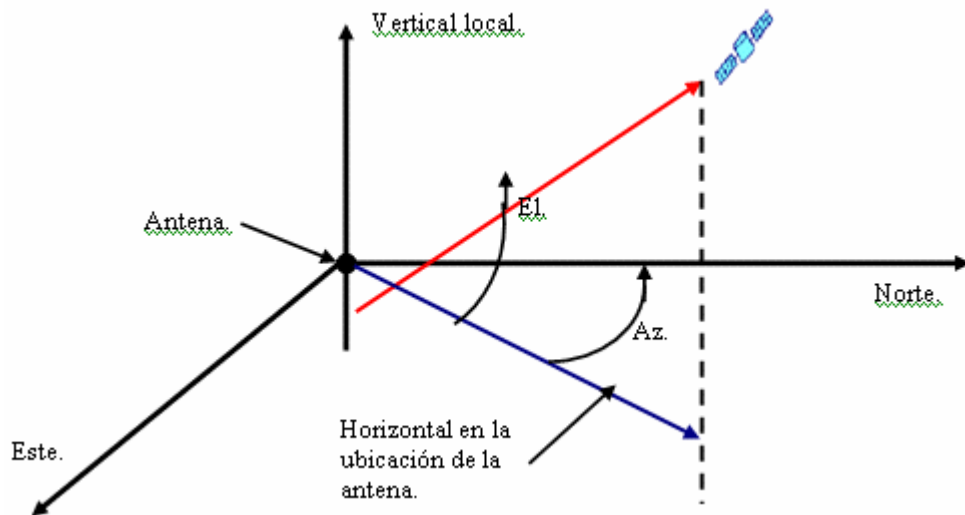


Figura 18: Ángulos de elevación y azimut [25]

Para calcular estos ángulos será necesario conocer las coordenadas del satélite, su altitud (distancia entre punto subsatélite y satélite) y las coordenadas de la entidad terrena implicada (ya sea hub o terminal VSAT).

Para que haya cobertura geográfica el ángulo de elevación deberá ser mayor de 5° típicamente (para algunos usuarios de sistemas VSAT serán 10°). Con un ángulo menor sería imposible la comunicación debido a que la radiación que emite la Tierra interferiría en ella.

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\hat{El} = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta \cos \Delta\varphi - \frac{R_e}{R_e + h}}{\sin[\cos^{-1}(\cos \theta \cos \Delta\varphi)]} \right) \quad (1)$$

El es el ángulo de elevación. R_e es el radio equivalente de la Tierra, h es la altura del satélite, θ es la latitud de la estación terrena y $\Delta\varphi = \varphi_T - \varphi_S$ es la longitud relativa, es decir la diferencia entre la longitud de la estación terrena y la longitud del satélite.

Hay que destacar que θ es la latitud de la estación terrena porque la latitud del satélite siempre será 0. Esto es así porque es geoestacionario y siempre orbitará sobre el ecuador.

Para hallar el ángulo azimut es necesario calcular un parámetro que se denominará A' . La fórmula para hallarlo es la siguiente:

$$A' = \tan^{-1} \frac{\tan \Delta\varphi}{\sin \theta} \quad (2)$$

Partiendo de dicho parámetro y dependiendo de la ubicación de la estación terrena respecto del satélite, el ángulo azimut Az será:

- $\hat{Az} = A' + 180^\circ$, si la estación terrena está en el hemisferio norte.
- $\hat{Az} = A'$, si la estación terrena está en el hemisferio sur

Una vez conocidos estos ángulos y se ha cotejado que hay cobertura geográfica, se pasa al cálculo de la calidad del enlace.

3.11.2 Balance de enlace

Todos los datos citados al principio de este capítulo serán necesarios para calcular el balance de enlace. Para ello, lo primero que se ha de calcular es la relación portadora a ruido ($\frac{C}{N_0}$). Habrá que calcularlo para cada enlace:

- **Inbound de subida**

$$\frac{C}{N_{0\text{Ib}\uparrow}} = PIRE_{VSAT} + \frac{G}{T_{sat}} - IBO - L_{prop} - 10 \log K \quad (3)$$

Donde $\frac{C}{N_0}$ y $10 \log K$ se miden en dBHz, la PIRE en dBW, $\frac{G}{T}$ es un factor de calidad del receptor, que relaciona la ganancia y temperatura de ruido y que se mide en dB/K y la IBO y las pérdidas de propagación (L_{prop}) se miden en dB. También se puede tener en cuenta el ancho de banda del enlace desde el principio y calcular directamente $\frac{C}{N}$.

$$\frac{C}{N_{Ib\uparrow}} = PIRE_{VSAT} + \frac{G}{T_{sat}} - IBO - L_{prop} - 10 \log KBW_{Ib\downarrow} \quad (4)$$

La única diferencia entre (3) y (4) es que $\frac{C}{N}$ y $10 \log KBW_{Ib\downarrow}$ se miden en decibelios (dB).

El factor $10 \log K$ o $10 \log KBW$ es referente a un ruido que producen las antenas según su temperatura. El factor completo incluiría también T, sin embargo este ya está contemplado en el factor de calidad de la antena. $K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

De ahí,

$$PIRE_{VSAT} = 10 \log P_{tx} + G_{tx} \quad (5)$$

La Potencia de transmisión estará expresada en Watt, y de este modo su logaritmo así como la ganancia se medirá en dB.

En ocasiones la PIRE está asociada a un ancho de banda. En esos casos habrá que realizar el cálculo de la PIRE por canal:

$$PIRE' = PIRE - 10 \log \frac{BW_{PIRE}}{BW_{canal}} \quad (6)$$

El factor de calidad en recepción se calculará así:

$$\frac{G}{T_{sat}} = L_{Rx} + 10 \log \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda_{Ib\uparrow}} \right)^2 \right] - 10 \log T \quad (7)$$

Donde las pérdidas se expresan en dB y η , D y T son la eficiencia, el diámetro y la temperatura de ruido de la antena respectivamente. T se mide en Kelvin (K).

Y $\lambda_{Ib\uparrow}$ es la longitud de la onda a la frecuencia correspondiente a este enlace ($Ib \uparrow$) y se expresa en metros.

La longitud de onda se halla así:

$$\lambda_{Ib\uparrow} = \frac{c}{f_{Ib\uparrow}} \quad (8)$$

La constante c es la velocidad de la luz, $3 \cdot 10^8$ m/s típicamente y f es la frecuencia correspondiente al enlace (en este caso *Inbound* ascendente) en Hz.

Por último, el factor de pérdidas de propagación se calculará con la siguiente fórmula:

$$L_{prop} = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda_{Ib\uparrow}} \right)^2 \quad (9)$$

Que se expresa en dB y donde d se refiere a la distancia existente entre satélite y la estación terrena implicada, en este caso el terminal VSAT. Para hallar dicha distancia se hará uso de la siguiente fórmula:

$$d = \sqrt{(R_e + h)^2 + R_e^2 - 2R_e(R_e + h)\cos \theta \cos \Delta\varphi} \quad (10)$$

Donde R_e es el Radio equivalente de la Tierra, h es la altitud, θ es la latitud de la estación terrena y $\Delta\varphi$ es la longitud relativa, es decir, la diferencia entre la longitud del satélite y la estación terrena. La distancia se mide en metros.

De esta manera se obtendrá la relación portadora a ruido del enlace *Inbound* de subida. Y de manera análoga se conseguirán las relaciones de los otros enlaces:

- ***Inbound* de bajada**

$$\frac{C}{N_{0Ib\downarrow}} = PIRE_{sat} + \frac{G}{T_{hub}} - OBO - L_{prop} - 10 \log K \quad (11)$$

$$\frac{C}{N_{Ib\downarrow}} = PIRE_{sat} + \frac{G}{T_{hub}} - OBO - L_{prop} - 10 \log KBW_{Ib\downarrow} \quad (12)$$

- **Outbound de subida**

$$\frac{c}{N_{0Ob\uparrow}} = PIRE_{hub} + \frac{G}{T_{sat}} - IBO - L_{prop} - 10 \log K \quad (13)$$

$$\frac{c}{N_{Ob\uparrow}} = PIRE_{hub} + \frac{G}{T_{sat}} - IBO - L_{prop} - 10 \log KBW_{Ob\uparrow} \quad (14)$$

- **Outbound de bajada**

$$\frac{c}{N_{0Ob\downarrow}} = PIRE_{sat} + \frac{G}{T_{VSAT}} - OBO - L_{prop} - 10 \log K \quad (15)$$

$$\frac{c}{N_{Ob\downarrow}} = PIRE_{sat} + \frac{G}{T_{VSAT}} - OBO - L_{prop} - 10 \log KBW_{Ob\downarrow} \quad (16)$$

Una vez que se han calculado estas relaciones, se deben pasar a unidades naturales. Esto es deshacer el paso a decibelios (dB) con lo que se obtendrá el coeficiente $\frac{c}{n_0}$ ó $\frac{c}{n}$. Cuando se expresa en minúsculas significa que está expresado en unidades naturales, que en este caso serán Watt·Hz ó Watt respectivamente.

Esta conversión se hace para poder calcular la relación portadora a ruido general, que se halla de esta manera:

$$\left(\frac{c}{n_0}\right)_T^{-1} = \left(\frac{c}{n_0}\right)_\uparrow^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_\downarrow^{-1} \quad (17)$$

Se realizará esta operación tanto para el *Inbound* como para el *Outbound*. A partir de aquí, habrá de aplicarse cada fórmula para cada uno de estos dos enlaces.

Tras este cálculo, se procede a hallar la energía de bit por unidad de ruido $\frac{e_b}{n_0}$.

$$\frac{e_b}{n_0} = \frac{c}{n_0} \cdot \frac{1}{R_b} = \frac{c}{n} \cdot \frac{BW}{R_b} \quad (18)$$

Donde R_b es la tasa binaria utilizada para el enlace, que se mide en bps (bits/s).

Una vez calculada la relación energía por bit y ruido se procederá a calcular la probabilidad de error de bit (BER) que es el valor con el que se evaluará la calidad del enlace. Y es aquí donde entra en juego la modulación, pues según la modulación de la señal la BER se hallará con una u otra fórmula.

La BER para las modulaciones más utilizadas en redes VSAT se halla del siguiente modo:.

- BPSK
- QPSK

$$BER = Q\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (19)$$

- N-QAM

$$BER = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{N}}\right) Q\left(\frac{E_b \log_2 N}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{3}{N-1}}\right) \quad (20)$$

Donde η es la eficiencia espectral asociada a la modulación.

Tal como se ha mencionado con anterioridad, la BER es la característica con la que se evaluará la calidad del enlace. Cuanto menor sea, mejor será el enlace.

La función Q es una forma de expresar probabilidades para variables aleatorias gaussianas. $Q(x)$ con $x \in \mathbb{R}$ se define como la probabilidad de que una variable aleatoria gaussiana estándar (media 0 y varianza 1) sea mayor que x. Esto es:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (21)$$

Esta es una integral irresoluble, pero existe una tabla de valores aproximados:

x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$
0.00	5.00000×10^{-1}	2.05	2.01822×10^{-2}	4.10	2.06575×10^{-5}	6.15	3.87415×10^{-10}
0.05	4.80061×10^{-1}	2.10	1.78644×10^{-2}	4.15	1.66238×10^{-5}	6.20	2.82316×10^{-10}
0.10	4.60172×10^{-1}	2.15	1.57776×10^{-2}	4.20	1.33457×10^{-5}	6.25	2.05226×10^{-10}
0.15	4.40382×10^{-1}	2.20	1.39034×10^{-2}	4.25	1.06885×10^{-5}	6.30	1.48823×10^{-10}
0.20	4.20740×10^{-1}	2.25	1.22245×10^{-2}	4.30	8.53991×10^{-6}	6.35	1.07657×10^{-10}
0.25	4.01294×10^{-1}	2.30	1.07241×10^{-2}	4.35	6.80688×10^{-6}	6.40	7.76885×10^{-11}
0.30	3.82089×10^{-1}	2.35	9.38671×10^{-3}	4.40	5.41254×10^{-6}	6.45	5.59251×10^{-11}
0.35	3.63169×10^{-1}	2.40	8.19754×10^{-3}	4.45	4.29351×10^{-6}	6.50	4.01600×10^{-11}
0.40	3.44578×10^{-1}	2.45	7.14281×10^{-3}	4.50	3.39767×10^{-6}	6.55	2.87685×10^{-11}
0.45	3.26355×10^{-1}	2.50	6.20967×10^{-3}	4.55	2.68230×10^{-6}	6.60	2.05579×10^{-11}
0.50	3.08538×10^{-1}	2.55	5.38615×10^{-3}	4.60	2.11245×10^{-6}	6.65	1.46547×10^{-11}
0.55	2.91160×10^{-1}	2.60	4.66119×10^{-3}	4.65	1.65968×10^{-6}	6.70	1.04210×10^{-11}
0.60	2.74253×10^{-1}	2.65	4.02459×10^{-3}	4.70	1.30081×10^{-6}	6.75	7.39226×10^{-12}
0.65	2.57846×10^{-1}	2.70	3.46697×10^{-3}	4.75	1.01708×10^{-6}	6.80	5.23096×10^{-12}
0.70	2.41964×10^{-1}	2.75	2.97976×10^{-3}	4.80	7.93328×10^{-7}	6.85	3.69250×10^{-12}
0.75	2.26627×10^{-1}	2.80	2.55513×10^{-3}	4.85	6.17307×10^{-7}	6.90	2.60013×10^{-12}
0.80	2.11855×10^{-1}	2.85	2.18596×10^{-3}	4.90	4.79183×10^{-7}	6.95	1.82643×10^{-12}
0.85	1.97663×10^{-1}	2.90	1.86581×10^{-3}	4.95	3.71067×10^{-7}	7.00	1.27981×10^{-12}
0.90	1.84060×10^{-1}	2.95	1.58887×10^{-3}	5.00	2.86652×10^{-7}	7.05	8.94589×10^{-13}
0.95	1.71056×10^{-1}	3.00	1.34990×10^{-3}	5.05	2.20905×10^{-7}	7.10	6.23784×10^{-13}
1.00	1.58655×10^{-1}	3.05	1.14421×10^{-3}	5.10	1.69827×10^{-7}	7.15	4.33890×10^{-13}
1.05	1.46859×10^{-1}	3.10	9.67603×10^{-4}	5.15	1.30243×10^{-7}	7.20	3.01063×10^{-13}
1.10	1.35666×10^{-1}	3.15	8.16352×10^{-4}	5.20	9.96443×10^{-8}	7.25	2.08386×10^{-13}
1.15	1.25072×10^{-1}	3.20	6.87138×10^{-4}	5.25	7.60496×10^{-8}	7.30	1.43884×10^{-13}
1.20	1.15070×10^{-1}	3.25	5.77025×10^{-4}	5.30	5.79013×10^{-8}	7.35	9.91034×10^{-14}
1.25	1.05650×10^{-1}	3.30	4.83424×10^{-4}	5.35	4.39771×10^{-8}	7.40	6.80922×10^{-14}
1.30	9.68005×10^{-2}	3.35	4.04058×10^{-4}	5.40	3.33204×10^{-8}	7.45	4.66701×10^{-14}
1.35	8.85080×10^{-2}	3.40	3.36929×10^{-4}	5.45	2.51849×10^{-8}	7.50	3.19089×10^{-14}
1.40	8.07567×10^{-2}	3.45	2.80293×10^{-4}	5.50	1.89896×10^{-8}	7.55	2.17629×10^{-14}
1.45	7.35293×10^{-2}	3.50	2.32629×10^{-4}	5.55	1.42835×10^{-8}	7.60	1.48065×10^{-14}
1.50	6.68072×10^{-2}	3.55	1.92616×10^{-4}	5.60	1.07176×10^{-8}	7.65	1.00490×10^{-14}
1.55	6.05708×10^{-2}	3.60	1.59109×10^{-4}	5.65	8.02239×10^{-9}	7.70	6.80331×10^{-15}
1.60	5.47993×10^{-2}	3.65	1.31120×10^{-4}	5.70	5.99037×10^{-9}	7.75	4.59463×10^{-15}
1.65	4.94715×10^{-2}	3.70	1.07800×10^{-4}	5.75	4.46217×10^{-9}	7.80	3.09536×10^{-15}
1.70	4.45655×10^{-2}	3.75	8.84173×10^{-5}	5.80	3.31575×10^{-9}	7.85	2.08019×10^{-15}
1.75	4.00592×10^{-2}	3.80	7.23480×10^{-5}	5.85	2.45787×10^{-9}	7.90	1.39452×10^{-15}
1.80	3.59303×10^{-2}	3.85	5.90589×10^{-5}	5.90	1.81751×10^{-9}	7.95	9.32558×10^{-16}
1.85	3.21568×10^{-2}	3.90	4.80963×10^{-5}	5.95	1.34071×10^{-9}	8.00	6.22096×10^{-16}
1.90	2.87166×10^{-2}	3.95	3.90756×10^{-5}	6.00	9.86588×10^{-10}		
1.95	2.55881×10^{-2}	4.00	3.16712×10^{-5}	6.05	7.24229×10^{-10}		
2.00	2.27501×10^{-2}	4.05	2.56088×10^{-5}	6.10	5.30342×10^{-10}		

Figura 19: Tabla de valores función Q

4 Descripción de la aplicación

La aplicación desarrollada en este TFG permite evaluar la calidad del enlace de cualquier sistema VSAT. La aplicación se ha implementado en lenguaje de programación Java íntegramente.

4.1 Funcionalidades

Dentro del ámbito de los sistemas VSAT, son dos las situaciones que se han contemplado.

La primera de ellas es una situación normal en la que un Hub y terminal VSAT se comunican entre sí a través de un satélite, es decir que cada entidad tiene su ubicación y características (previamente introducidas por el usuario) y se realizan y se muestran los cálculos para evaluar la calidad del enlace, así como los referentes a los ángulos de azimut y de elevación.

La segunda de ellas permite simular un terminal VSAT que se desplaza a lo largo del planeta. Para ello, el usuario puede clicar en una imagen de un mapa del mundo para seleccionar los lugares por donde pasará el VSAT.

Se han implementado dos posibilidades a la hora de simular el desplazamiento del terminal VSAT:

- **Desplazamiento lineal:** el VSAT se desplaza en línea recta. Antes de hacer la simulación, se le pide al usuario el número de puntos en los que quiere evaluar la cobertura con el satélite. Después traza la recta sobre el mapa y se calcula el balance del enlace y los ángulos azimut y de elevación en el número de puntos que haya introducido, que estarán equidistantes sobre la trayectoria recta. En la imagen se puede observar un ejemplo. En ella aparecen un punto amarillo y otro magenta, que se corresponden con la ubicación del satélite y el Hub respectivamente. Además, la línea aparece azul o roja según haya o no cobertura:

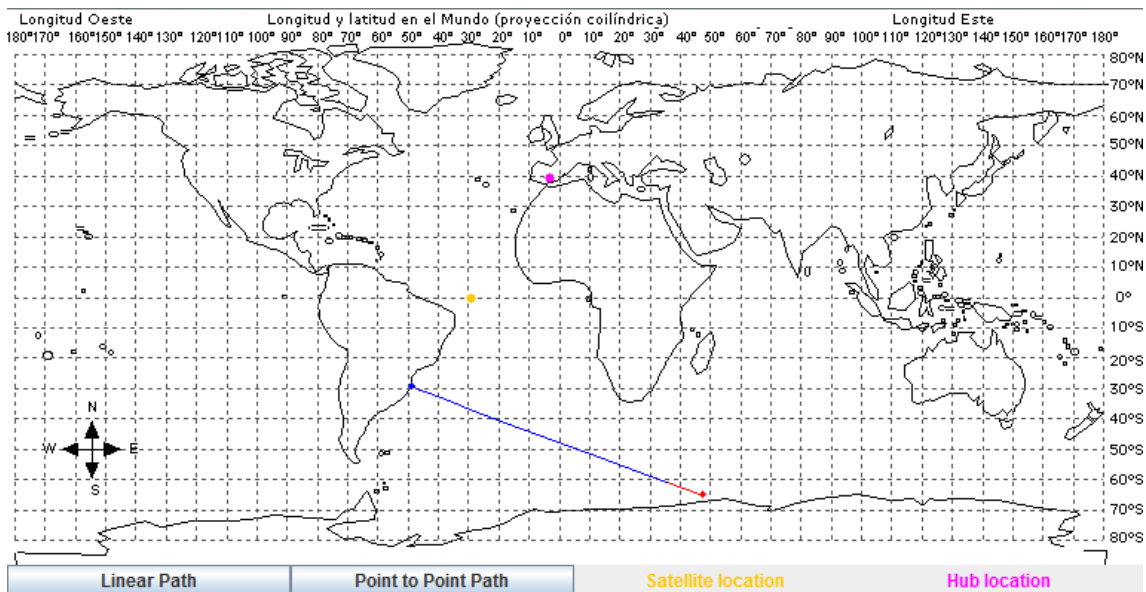


Figura 20 : Ejemplo de VSAT en movimiento lineal

- **Movimiento "punto a punto":** esta opción simula el movimiento del VSAT de un punto a otro del mapa. Se calcula el balance de enlace así como los ángulos de elevación y azimut con que habrá que orientar la antena del VSAT hacia el satélite. En la imagen aparece un ejemplo de esta simulación:

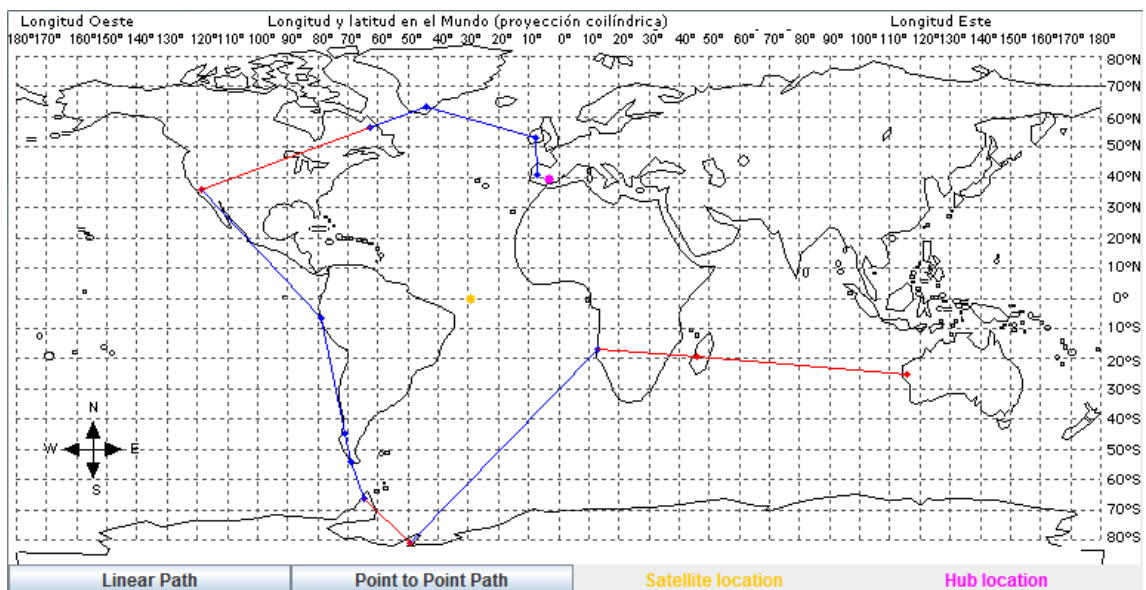


Figura 21 : Ejemplo de VSAT en movimiento punto a punto

4.2 Estructura

Como se mencionaba en los objetivos, uno de ellos era el de implementar una aplicación modular y esto es lo que se ha hecho. El lenguaje de programación Java es orientado a objetos y se divide en clase. La herramienta se ha dividido en bloques, que se componen de una o más clases. Estos bloques son los siguientes:

- **Bloque de entidades de datos.** Hay un bloque de datos por cada una de las entidades involucradas (satélite, Hub, terminal VSAT y enlace). Hay una clase por cada una de ellas, excepto para el Hub y el VSAT que se ha creado además una clase estación terrena que es padre de estas dos y que será muy útil para hacer más sencillo y ligero el código. Esto es así porque ambos tienen los mismos atributos.

De estas clases será de donde salgan los Objetos que serán los que almacenen la información que introduzca el usuario.

- **Bloque gráfico.** Este engloba tres, que estarán entrelazados entre sí:
 - **Bloque gráfico:** todas las clases que utilizan interfaz gráfica heredan de la clase predefinida por Java *JFrame*. Los menús principales o de introducción de datos así como los de muestra de resultados utilizan interfaz gráfica y cada uno de ellos tiene una clase, excepto para la introducción de datos del Hub y VSAT que hay una clase que gestiona ambas funciones y que distingue entre uno u otro mediante un parámetro de entrada.
 - **Bloque de introducción de datos.** Como se acaba de explicar se ha implementado una clase para introducción de los datos del enlace, del satélite y una para VSAT y Hub. Cabe destacar que existe una clase extra que permite al usuario introducir las coordenadas de los VSAT y Hub clicando sobre un mapa.
 - **Bloque de muestra de resultados y funcionalidades extra.** En una clase se muestran todos los cálculos realizados así como los datos introducidos de las entidades.

Se ha implementado otra clase que se encarga de mostrar los datos introducidos y también de gestionar las funcionalidades explicadas en el apartado anterior.

- **Bloque de guardado y carga de ficheros.** Tan solo una clase se encarga de estas tareas. Es una clase que contiene métodos estáticos (esto es que se pueden invocar desde otras clases sin necesidad de crear un objeto de esa clase, del mismo modo que se invocan métodos de la

clase predefinida de Java *Math*) que realizan el guardado o carga bien sea de uno de los elementos o de todos juntos, pues se han contemplado ambas opciones.

- **Bloque de cálculos.** Análogo al caso de guardado y carga de ficheros, se ha implementado una clase que realiza todos los cálculos pertinentes.

Cabe destacar que para hacer los cálculos relativos a la función Q (explicada al final del capítulo "3.11 Formulación para el cálculo de cobertura y balance de enlace en un sistema VSAT") se ha hecho uso de una librería que es propiedad de apache y que se puede encontrar en el siguiente enlace:

http://commons.apache.org/proper/commons-math/download_math.cgi

En este bloque también se realizan algunos cálculos numéricos que no están relacionados con el balance de enlace sino que se utilizan para el correcto funcionamiento de la aplicación.

Se ha realizado un diagrama de bloques en el que se puede apreciar la interacción entre los mismo:

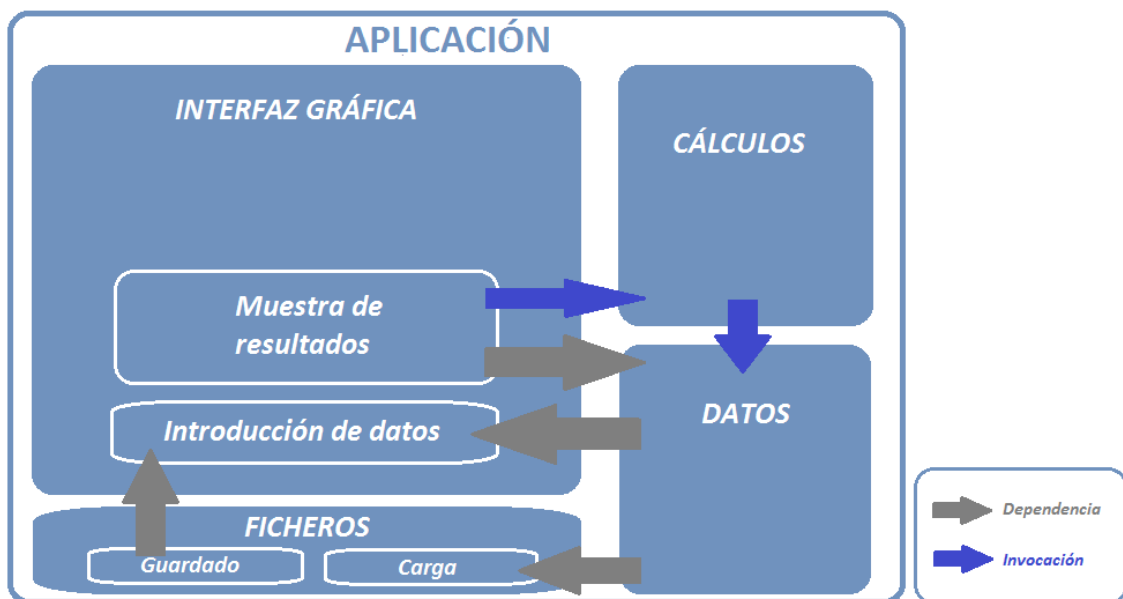


Figura 22 : Diagrama de bloques

En la imagen se puede apreciar como los distintos bloques están separados y cómo dependen y/ o se invocan unos a otros.

Algo que no se había mencionado hasta ahora y que se puede ver en la imagen es la dependencia que existe entre la muestra de resultados y los datos. Esto significa que, como es lógico, si no hay datos no se pueden mostrar los resultados.

También se ha realizado un diagrama de flujo del programa:

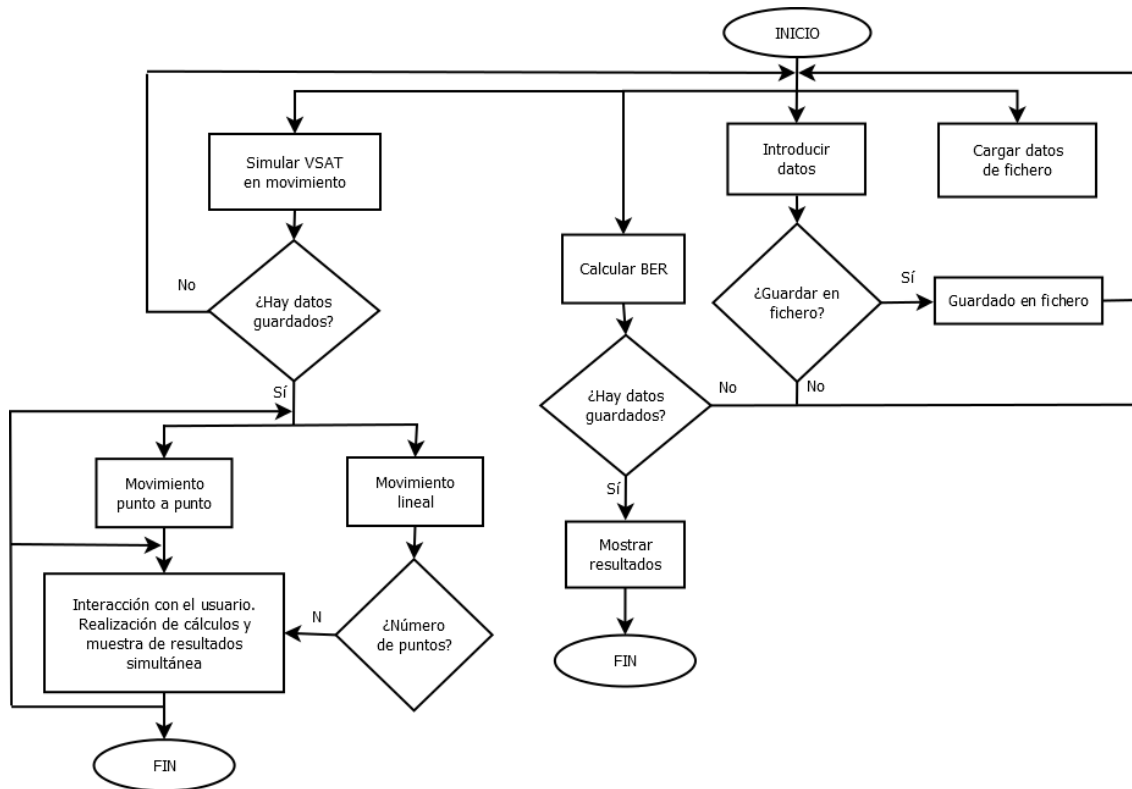


Figura 23 : Diagrama de flujo

4.3 Funcionamiento

Lo primero que se necesita es que el usuario introduzca las características de las tres entidades implicadas (satélite, estación hub y estación VSAT) y las características propias del enlace. Además se le ofrece la opción de guardar dicha información en ficheros que podrá cargar en futuros usos. Todo esto aparece en el menú principal, tal como se puede apreciar en la imagen:

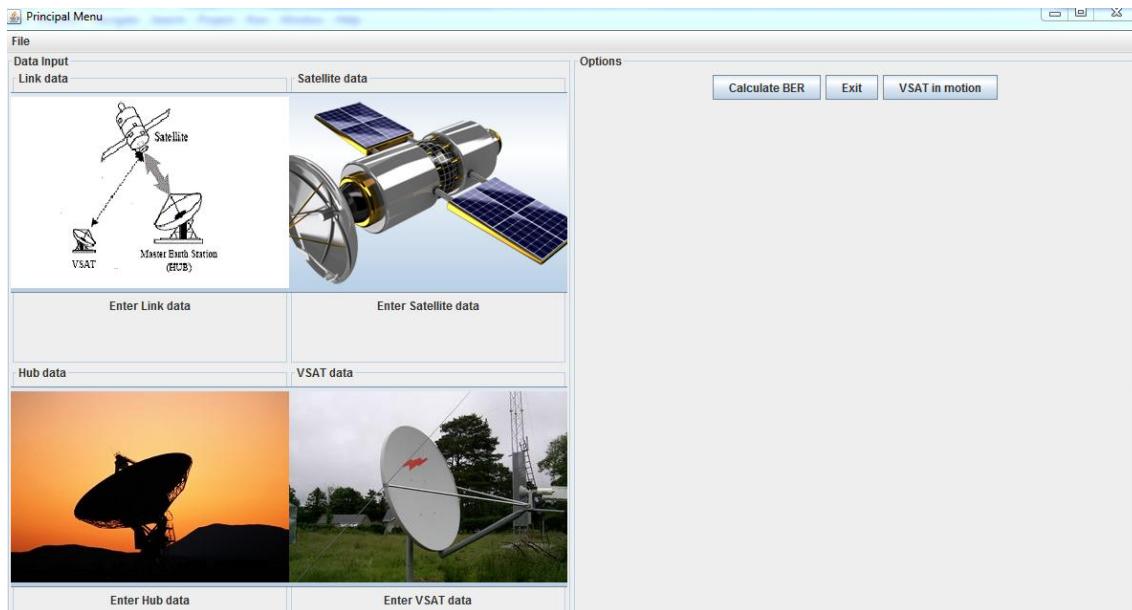


Figura 24: Menú principal de la aplicación

Las imágenes que aparecen se pueden conseguir en los siguientes enlaces:

- Enlace:
<http://www.level421.com/uploads/pics/vsat-point to point 03.GIF>
- Satélite:
<http://www.carboncredit2012.com/site/templates/tplcaroncredit2012-1/images/satellite.png>
- Hub:
<http://www.tonex.com/wp-content/uploads/64130.jpg>
- VSAT:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/92/1.2m_Andrew_VSAT_ODU_01.jpg/300px-1.2m_Andrew_VSAT_ODU_01.jpg

Para introducir los parámetros característicos de cada entidad tan solo hay que hacer clic en las imágenes respectivas, con lo que se abre un menú como este:

File	
Save	Uplink Inbound BandWidth*
Load File	Downlink Inbound BandWidth*
	Uplink Outbound BandWidth*
	Downlink Outbound BandWidth*
	Uplink Inbound frequency*
	Downlink Inbound frequency*
	Uplink Outbound frequency*
	Downlink Outbound frequency*
	Inbound bit-Rate*
	Outbound bit-Rate*
	Modulation*
Accept	Back
* Obligatory field(s)	
ERROR! Enter only numeric values	

Figura 25: Introducción de datos del enlace

En este panel se introducen los datos y se pulsa el botón "Accept", con lo que aparece el mensaje rojo que indica que algo ha ocurrido un error y la razón del mismo. En caso contrario aparecería un mensaje verde que los datos han sido introducidos correctamente. También existe la opción de guardar los datos en un fichero o cargarlos del mismo. Esto abriría una ventana de este tipo:

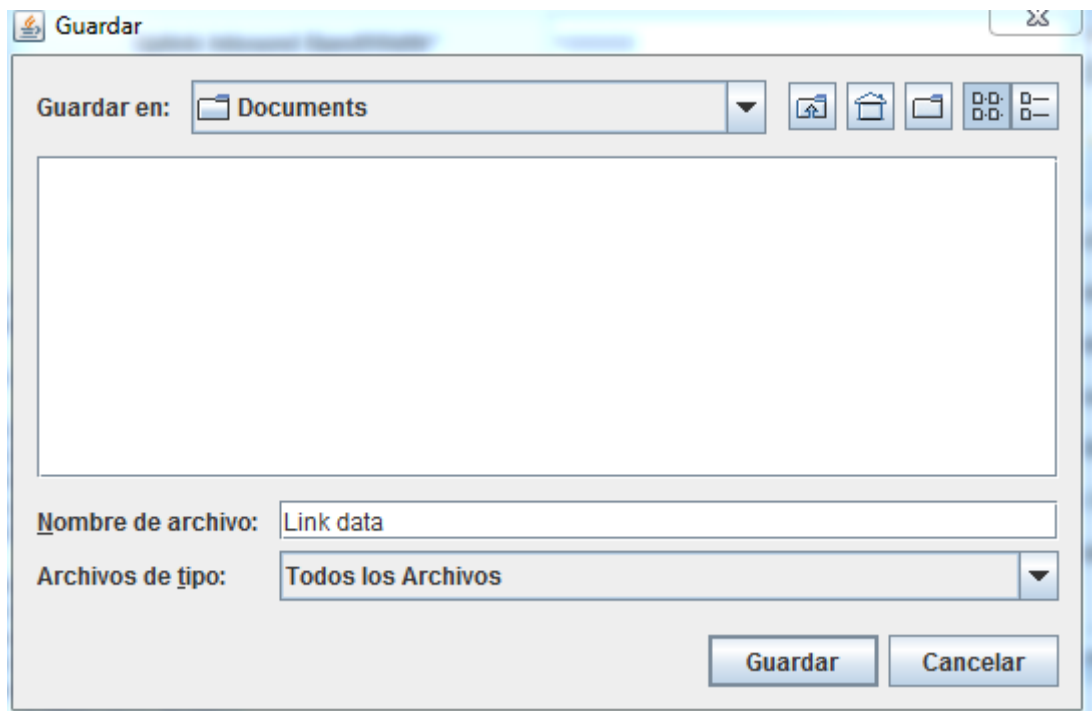


Figura 26: Panel de guardado en fichero

Los paneles de las otras tres entidades son prácticamente iguales con la salvedad de que los de Hub y VSAT ofrecen la posibilidad de introducir las coordenadas donde se ubica la estación directamente en un mapa. El menú donde se introducen estas coordenadas es el siguiente:

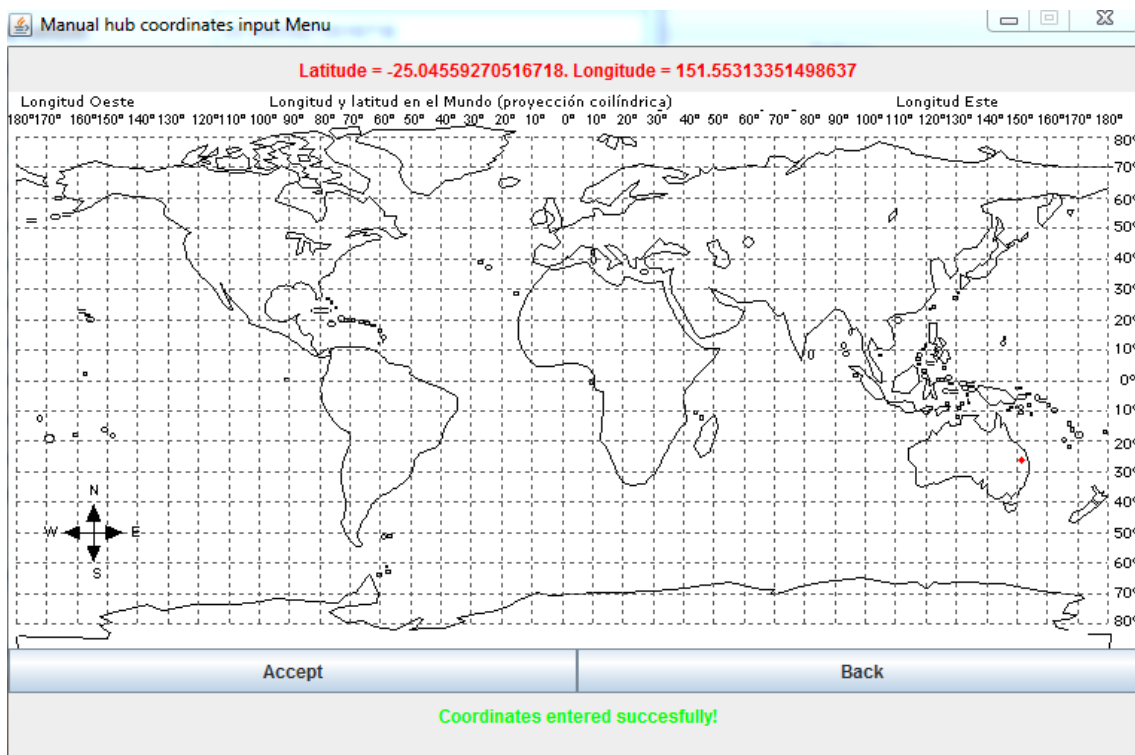


Figura 27: Introducción de coordenadas de estación terrena sobre el mapa

La imagen utilizada se puede conseguir en la siguiente URL:
http://www.aularagon.org/files/espa/atlas/Latitud_longitud_mundo.gif

Una vez introducida dicha información, el usuario tiene dos opciones, que son las que aparecen en el panel derecho del menú principal ("*Calculate BER*" o "*VSAT in motion*") que son las dos funcionalidades explicadas anteriormente.

La primera opción abre un panel en el que se muestran los datos introducidos y los resultados, tal como se muestra en la imagen:

Results show Window					
Link Data		Satellite Data		Orientation of the antennas	
uplink Inbound BandWidth	200000.0	IBO	3.0	Hub's azimuth	217.62703860038312
downlink Inbound BandW...	200000.0	OBO	2.0		
uplink Outbound BandWidth	200000.0	[-80°S, 80°N] Latitude	0		
downlink Outbound Band...	200000.0	[-180°W, 180°E] Longitude	-30.0	Hub's elevation angle	36.03799626019693
uplink Inbound frequency	1.2E10	PIRE	30.0		
downlink Inbound frequency	1.5E9	transmission BandWidth	3.6E7		
uplink Outbound frequency	1.3E10	transmission Power	1.0	VSAT's azimuth	238.51184421272416
downlink Outbound freque...	1.6E9	transmission Gain	0.0		
Inbound bit-Rate	400000.0	transmission Loss	0.0		
Outbound bit-Rate	400000.0	Receiving Gain	0.0	VSAT's elevation angle	23.78791654627287
Modulation	QPSK	Receiving Loss	0.0		
		Gain-Temperature ratio	-		
		Antenna Diameter	5.0		
		Noise Temperature	250.0		
		Antenna efficiency	0.95		
Hub Data		VSAT Data		Results	
[-80°S, 80°N] Latitude	40.3	[-80°S, 80°N] Latitude	40.2	Inbound Carrier-Noise Ratio	55.203468220427794
[-180°W, 180°E] Longitude	-3.5	[-180°W, 180°E] Longitude	16.5	Outbound Carrier-Noise R...	49.5376395633916
PIRE	20.0	PIRE	-	Inbound Eb/No Ratio	0.8284891604890533
transmission BandWidth	600000.0	transmission BandWidth	0.0	Outbound Eb/No Ratio	0.2247522069699916
transmission Power	1.0	transmission Power	5.0	Inbound BER	0.09900589961094686
transmission Gain	0.0	transmission Gain	0.0	Outbound BER	0.2512851971311224
transmission Loss	0.0	transmission Loss	2.0		
Receiving Gain	0.0	Receiving Gain	0.0		
Receiving Loss	0.0	Receiving Loss	1.0		
Gain-Temperature ratio	-	Gain-Temperature ratio	-		
Antenna Diameter	6.0	Antenna Diameter	2.0		
Noise Temperature	250.0	Noise Temperature	250.0		
Antenna efficiency	0.85	Antenna efficiency	0.7		

Figura 28: Cálculo de la BER

La otra opción abre una ventana como esta:

moving vsat menu

Longitud Oeste

Longitud y latitud en el Mundo (proyección cilíndrica)

Longitud Este

180°170° 160°150° 140°130° 120°110° 100° 90° 80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90° 100° 110° 120°130° 140°150° 160°170° 180°

Figura 29: Menú "VSAT en movimiento"

En el panel derecho se muestran los datos introducidos y en el panel izquierdo aparecen un mapa en el que el usuario puede elegir cualquiera de las dos opciones explicadas anteriormente y debajo aparecen los resultados de los cálculos realizados en cada uno de los puntos por los que pasa el terminal VSAT en la simulación.

En el mapa también aparecen dos puntos, uno amarillo y otro magenta que se corresponden con la localización del satélite y del Hub respectivamente. La línea que aparece es la trayectoria que sigue el terminal VSAT, que aparece de color azul cuando existe cobertura *Inbound* y *Outbound* y en roja cuando fallan cualquiera de ellas o ambas.

Cabe destacar también que existen mensajes de error o advertencia para cualquier anomalía o circunstancia especial que pueda ocurrir, como por ejemplo intentar calcular la BER sin previamente haber introducido los datos pertinentes, o siempre que se intenta cerrar una ventana, que aparece una ventana de diálogo para advertir sobre el cierre de la ventana.

4.4 Dificultades encontradas

Se han encontrado ciertas dificultades durante el desarrollo del código. En general estas dificultades fueron subsanadas según fueron apareciendo.

En general la interfaz gráfica es lo que más problemas ha supuesto. Dado que era algo nuevo para el autor, al principio fue necesaria una labor de aprendizaje intensiva. A partir de aquí las dificultades fueron más rápidas y fácilmente subsanables, aunque no fueron pocas las veces que fue necesario consultar la API de Java, algunos foros o páginas de consulta. Además, separar la parte de código destinada a interfaz de lo demás en algunas ocasiones fue complicado pero finalmente se ha conseguido hacer una separación bastante notable.

Como se ha mencionado en el apartado "4.2 Estructura", se ha hecho uso de una librería que es propiedad de apache. Esta fue una dificultad además de una sorpresa encontrada, pues se esperaba que la clase *Math* permitiera realizar el cálculo de la función Q. Tras una labor de búsqueda vía Internet, se encontró una solución muy eficaz.

La mayor dificultad encontrada surgió con la necesidad de hacer uso de variables pertenecientes a una clase en otra clase. Esto es, la clase del menú principal tiene una serie de variables. Al abrir otra ventana resulta necesario hacer uso de ellas y modificarlas. Esto supuso una ardua búsqueda, pues no era fácil encontrar información tan específica. Finalmente, se consiguió subsanar y seguir adelante.

Muchas más dificultades han ido surgiendo, pero no han supuesto un importante hándicap. Cabe destacar que la API de Java ha sido de gran ayuda para consultar todo tipo de información. La API es una web donde se encuentran explicadas en detalle todas las clases (así como sus constructores, métodos etc.) que los creadores del lenguaje predefinieron para poder hacer uso del mismo. Esta web se encuentra en el siguiente enlace:

<http://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/>

4.5 Posibles mejoras

Teniendo las hojas de código es posible implementar las mejoras que se deseen y dado que la aplicación es totalmente gratuita, cualquiera tiene la posibilidad de hacerlo.

Las mejoras son muy variadas, pues se pueden implementar funcionalidades nuevas o mejorar las ya existentes. Así como mejorar o cambiar la interfaz gráfica.

Algunas mejoras son las siguientes:

- Al hacer la búsqueda de aplicaciones similares se observó que muchas de ellas tenían en cuenta muchos tipos de pérdidas a la hora de calcular el balance de enlace. Esto haría que la herramienta fuese más eficaz para casos reales.
- Para mejorar la eficiencia de ejecución se podrían hacer modificaciones en el código para optimizarlo a pesar de que la intención ha sido la de hacerlo lo más ergonómico posible.
- Una de las mejoras más interesantes es la de hacer uso de *Google Earth* o plataformas similares para hacer la aplicación mucho más visual. De esta manera se podrían colocar los terminales VSAT y hub sobre el globo terráqueo y el satélite en órbita. También se podría simular una comunicación “a tiempo real”, es decir, que el planeta gire como lo hace normalmente y que el terminal VSAT también se moviera por la superficie terrestre calculando el balance del enlace en cada instante.

5 Validación de resultados

Con el objetivo de cotejar el correcto funcionamiento de la herramienta y la ausencia de errores en el código, se han realizado dos ejemplos manualmente para comparar los resultados obtenidos con los obtenidos con la aplicación.

Los ejemplos se han sacado de la lista de ejercicios y exámenes de la asignatura "Sistemas de Telecomunicación" de la titulación "Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación".

En el primer ejemplo, los datos son los siguientes:

- Datos del enlace:
 - Modulación QPSK
 - Tasa binaria para *Inbound*: 32 kbps
 - Tasa binaria para *Outbound*: 128 kbps
 - Ancho de banda para *Inbound*: 50 KHz
 - Ancho de banda para *Outbound*: 200 KHz
 - Frecuencia para enlace *Inbound* ascendente: 14.3 GHz
 - Frecuencia para enlace *Inbound* descendente: 11.8 GHz
 - Frecuencia para enlace *Outbound* ascendente: 14.1 GHz
 - Frecuencia para enlace *Outbound* descendente: 12 GHz
- Datos del satélite:
 - Posición: 30º O
 - Altura: 35876 Km
 - PIRE: 44 dBW
 - Ancho de banda del transpondedor: 72 MHz
 - Relación Ganancia-Temperatura: 0 dB/K
- Datos del Hub:
 - Posición: 40.5º N / 3.5º O
 - PIRE: 27 dBW
 - Pérdidas en transmisión y recepción: 2 dB
 - Diámetro de la antena: 5 m
 - Eficiencia de radiación de la antena: 70%
 - Temperatura de ruido de la antena: 200 K
- Datos del terminal VSAT:
 - Posición: 40.5º N / 3.5º O
 - Potencia de transmisión: 1 W
 - Pérdidas de transmisión y recepción: 1 dB
 - Diámetro de la antena: 1 m
 - Eficiencia de radiación de la antena: 65%
 - Temperatura de ruido de la antena: 200 K

Para estos datos se han realizado todos los cálculos pertinentes. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{lb} = 20.42 \text{ dBHz}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{ob} = 45.88 \text{ dBHz}$$

$$\left(\frac{e_b}{n_0}\right)_{lb} = 0.003442$$

$$\left(\frac{e_b}{n_0}\right)_{ob} = 0.3032$$

$$BER_{lb} = 0.46 = 46\%$$

$$BER_{ob} = 0.2118 = 21.2\%$$

Además se han calculado los ángulos de elevación y azimut para el Hub y el terminal VSAT. Los resultados son los siguientes:

$$\hat{E}l_{hub} = \hat{E}l_{VSAT} = 35.869^\circ$$

$$\hat{A}z_{hub} = \hat{A}z_{VSAT} = 217.51^\circ$$

En la herramienta los resultados obtenidos son los siguientes:

Orientation of the antennas	
Hub's azimuth	217.5134682739412
Hub's elevation angle	35.86394937942382
VSAT's azimuth	217.5134682739412
VSAT's elevation angle	35.86394937942382
Results	
Inbound Carrier-Noise Ratio	20.528239576722104
Outbound Carrier-Noise R...	46.19238532987124
Inbound Eb/No Ratio	0.0035291813810893733
Outbound Eb/No Ratio	0.32510867892379275
Inbound BER	0.46652262536762557
Outbound BER	0.2100174895886896

Figura 30: Resultados del ejemplo 1

Análogamente, para el segundo caso de estudio se ha realizado el mismo procedimiento. Los datos de este ejemplo son los siguientes:

- Datos del enlace:
 - Modulación QPSK
 - Tasa binaria para *Inbound* y *Outbound*: 400 kbps
 - Ancho de banda para *Inbound* y *Outbound*: 200 KHz
 - Frecuencia para enlace *Inbound* ascendente: 14.3 GHz
 - Frecuencia para enlace *Inbound* descendente: 11.8 GHz
 - Frecuencia para enlace *Outbound* ascendente: 14.1 GHz
 - Frecuencia para enlace *Outbound* descendente: 12 GHz
- Datos del satélite:
 - Posición: 30º O
 - Altura: 35685 Km
 - PIRE: 30 dBW
 - Ancho de banda del transpondedor: 36 MHz
 - IBO: 3 dB
 - OBO: 2 dB
 - Diámetro de la antena: 5 m
 - Eficiencia de radiación de la antena: 95%
 - Temperatura de ruido de la antena: 250 K
- Datos del Hub:
 - Posición: 40.2º N / 3.5º O
 - PIRE: 20 dBW
 - Ancho de banda del transpondedor: 6 MHz
 - Diámetro de la antena: 6 m
 - Eficiencia de radiación de la antena: 85%
 - Temperatura de ruido de la antena: 250 K
- Datos del terminal VSAT:
 - Posición: 40.5º N / 16.5º E
 - Potencia de transmisión: 5 W
 - Pérdidas de transmisión : 2 dB
 - Pérdidas en recepción: 1 dB
 - Diámetro de la antena: 5 m
 - Eficiencia de radiación de la antena: 70%
 - Temperatura de ruido de la antena: 250 K

Los resultados obtenidos manualmente son los siguientes:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{Ib} = 55.24 \text{ dBHz}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{Ob} = 49.58 \text{ dBHz}$$

$$\left(\frac{e_b}{n_0}\right)_{Ib} = 0.8358$$

$$\left(\frac{e_b}{n_0}\right)_{Ob} = 0.2274$$

$$BER_{Ib} = 0.0968 = 9.7\%$$

$$BER_{Ob} = 0.25 = 25\%$$

$$\hat{E}l_{hub} = 35.9^\circ$$

$$\hat{A}z_{hub} = 217.58^\circ$$

$$\hat{E}l_{VSAT} = 23.755^\circ$$

$$\hat{A}z_{VSAT} = 238.512^\circ$$

Y en la herramienta los resultados obtenidos son:

Orientation of the antennas	
Hub's azimuth	217.62703860038312
Hub's elevation angle	36.03799626019693
VSAT's azimuth	238.51184421272416
VSAT's elevation angle	23.78791654627287
Results	
Inbound Carrier-Noise Ratio	55.203468220427794
Outbound Carrier-Noise R...	49.5376395633916
Inbound Eb/No Ratio	0.8284891604890533
Outbound Eb/No Ratio	0.2247522069699916
Inbound BER	0.09900589961094686
Outbound BER	0.2512851971311224

Figura 31: Resultados del ejemplo 2

Como se puede apreciar, en ambos ejemplos los resultados manuales apenas difieren de los de la herramienta. Las diferencias existentes se deber al redondeo que se hace al realizarlos manualmente.

6 Conclusions

As it was mentioned in the section "1.2 Objectives" it has been developed an application able to evaluate the link budget of any VSAT net. It is a graphic tool and allows the user to interact with it. Moreover, it is quite intuitive and easy to use.

It has been explained all the necessary points to understand how satellite communications work and after it all the specific characteristics of VSAT systems have been mentioned. The mathematical formulas required to calculate the link budget also appears in the third chapter "*3. Comunicaciones por satélite. Marco teórico*".

In the next chapter it has been explained how the tool works, as well as its structure . Some pictures have been added to show that this is a graphic tool.

After it, some examples have been solved to compare with the results given by the application to check it works properly in the chapter "*5. Validación de resultados*".

There was one more objective. It was to simulate a VSAT terminal in motion around the world and to evaluate the link budget along its "trip". This function has been also developed so the application fulfilled all the desired objectives.

6.1 Budget

In this section there's a budget of the necessary money to carry out this Degree Thesis.

These are the factors to include in the budget:

- A computer to develop the application and write the memory.
- Microsoft Office license.
- Author's work. To calculate the time spent, it will be used the estimation from the schedule table that appears in the section "1.3 Planning", so the calculations will be done with 123 days and 6 hours per day.
- Tutor's work. Some consultations have taken place and it means spent time for the tutor. Around 5 times and 3 hours each one of them.
- Internet connection and power consumption.
- Indirect costs, considered as the 20% of the total price

In the following table there's the detailed budget:

STUFF/ STAFF	UNIT PRICE	UNITS	TOTAL PRICE
Computer	580 €	1	580 €
Microsoft Office license	18.98 €	1	18.98
Student's work	15 €/hour	738	11070 €
Teacher's work	45 €/hour	15	675 €
Internet connection and power consumption	72.45 €/month	6	434.7 €
Indirect costs	20% total	1	2555.74 €
Total:			15334.42 €

Table 5: Detailed budget

Adding the IVA (*Impuesto de Valor añadido*), which is a value added tax, and in Spain is the 21%, the final budget is $1.21 \times \text{Total}$.

So the final budget is **18554.65 €**.

REFERENCIAS

Se visitaron estos enlaces por última vez en 08/2015

- [I] y [21] "*VSAT System operation scheme*" y "*Sistema VSAT*"
<http://publicaciones.urbe.edu/index.php/telematique/article/viewFile/873/2158/6628>
- [II] y [24] "*Inbound & Outbound links*" y "*Enlaces Inbound y Outbound*"
<http://www.highspeedsat.com/images/linkstar/system1.jpg>
- [1] "*Ley 31/1987, de 18 de diciembre, de Ordenación de las Telecomunicaciones*"
<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1987-28143>
- [2] "*Ley 35/1992, de 22 de diciembre, de la Televisión por Satélite*"
<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1992-28428>
- [3] "*Ley 37/1995, de 12 de diciembre, de Telecomunicaciones por Satélite*"
<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1995-26837>
- [4] "*Calculador Automático de Balances de Enlace en Comunicaciones por Satélite Geoestacionarias*" <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12109/fichero/0+Indice.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12109/fichero/1+Introducci%F3n.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12109/fichero/2+Descripci%F3n+del+Proyecto.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12109/fichero/3+Manual+de+Usuario.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12109/fichero/4+Ejemplos+de+Utilizaci%F3n.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12109/fichero/5+Conclusiones+y+L%EDneas+Futuras+de+Desarrollo.pdf>
- [5] "*Balance de Potencias para GEO y para LEO, ICO y HEO*"
http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_15/sisbalan.htm
- [6] *Software para el análisis y cálculo de enlaces satelitales utilizando Matlab. "SATUTS"* <http://es.slideshare.net/fernando729/satuts>
- [7] *Satcoms UK*. <http://www.satcoms.org.uk/satellite/satellite-link-budget-calculator.asp?title=satellite-link-budget-calculator>
- [8] *Satmaster Pro Satellite Link Budget Software*. <http://www.arowe.com/>
- [9] *Satellite Link Budget Calculator*. <http://www.tutorialsworld.com/satcom/satellite-link-budget-calculator.htm>
- [10] *Downlink budget calculator*. <http://www.satellite-calculations.com/Satellite/Downlink.htm>

- [11] "Sputnik 1" <http://www.digitalmantenimientos.com/wp-content/uploads/2011/01/sputnik.jpg>
- [12] "Comunicaciones por satélite (esquema básico)" <http://www.areatecnologia.com/electronica/img4.jpg>
- [13] "International Space Station" <http://i.ytimg.com/vi/pembHq9d8c8/maxresdefault.jpg>
- [14] "Segmento espacial y terreno" http://wikitel.info/images/a/a5/Sistema_espacial.JPG
- [15] "Tipos de órbitas" <http://aulasat.wikispaces.com/file/view/intrmov2.gif/437727184/intrmov2.gif>
- [16] "Eclipse de Sol y stelital" http://es.sott.net/image/s11/233899/full/eclipse_dos.jpg
- [17] "Generación de señal CDMA" https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c6/Generation_of_CDMA.jpg
- [18] "Multiplexación y demultiplexación" <http://static.commentcamarche.net/es.kioskea.net/pictures/internet-images-mux.gif>
- [19] "Esquema de funcionamiento FDM" <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/72/Muxanalog.png>
- [20] "Esquema de funcionamiento TDM" http://www.tutorialspoint.com/data_communication_computer_network/images/tdm.jpg
- [22] "Red VSAT en malla" http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_4/arq/mesh.gif
- [23] "Red VSAT en estrella" http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_4/arq/star.gif
- [25] "Ángulos de elevación y azimut" <http://www.monografias.com/trabajos29/redes-satelitales/Image978.gif>